



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

OPTICKÉ MĚŘENÍ DEFORMACÍ PŘÍRUBOVÝCH SPOJŮ

OPTICAL MEASUREMENT OF DEFORMATIONS OF FLANGE JOINTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Markéta Schmidtová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Hurník

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Bc. Markéta Schmidtová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Hurník**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optické měření deformací přírubových spojů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V posledních letech byly upravovány normy související s bezpečností a spolehlivostí rozebíratelných přírubových spojů pracujících v kritických aplikacích jako jsou energetická a procesní zařízení. Jedná se mimo jiné o zvyšování kvalifikace personálu, který provádí montáž. Důvodem je, že při montáži mohou vzniknout výrazné odchylky od požadovaného koncového stavu, a to i při důsledném dodržení montážního postupu. Dále se pak jedná o zvyšování frekvence kontrol. Z důvodů změn teplot média procházejícího těmito spoji dochází k výrazným dilatacím, které spoj namáhají. Pokles předpětí svorníků z důvodu relaxace spoje způsobuje nižší přítlak na těsnění a může vést až k netěsnosti spoje. To vede v mnoha případech k neplánovanému odstavení zařízení a ztrátě ve výrobě. Zmíněné kontroly přírubových spojů, ať už se jedná o kontrolu montáže nebo pravidelnou kontrolu, se běžně provádějí zejména kontaktními metodami. Využití optických měřicích metod by přineslo možnost on-line kontroly přírubových spojů bez nutnosti vytížení kvalifikovaného personálu, což vede ke zvýšení spolehlivosti zařízení a zároveň snížení finančních nákladů.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je srovnání optických metod využitelných pro měření deformací přírubových spojů, jak při montáži přírubového spoje, tak během tepelného namáhání.

Dílčí cíle diplomové práce:

- rešerše problematiky optického měření deformací přírub a definování kritických provozních podmínek,
- experimentální srovnání měřicích metod z hlediska jejich přesnosti a šíře poskytovaných informací,
- diskuze využitelnosti měřicích metod v průmyslových podmínkách.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

LUHMANN, T. Close range photogrammetry: principles, techniques and applications. Dunbeath: Whittles Publishing, 2011. ISBN 978-1-84995-057-2.

ČSN EN 1591-1. Příruby a přírubové spoje - Pravidla pro navrhování těsněných kruhových přírubových spojů - Část 1: Výpočet. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 2015

HUANG, Y. H., L. LIU, T. W. YEUNG a Y. Y. HUNG. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation. Optics and Laser Technology. 2009, roč. 41, č. 4, s. 408–414. ISSN 00303992.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá optickým měřením přírubových spojů při utahování a teplotním zatěžování. Jsou porovnány komerčně dostupné optické systémy se sestupnou invazivitou v průmyslovém prostředí. Různé stavy zatěžování jsou vyhodnoceny jak ve 3D (skenování, DIC), tak ve 2D (DIC). Měřením při zatěžování jsou získána data pro vyhodnocení citlivosti i přesnosti systému s přidruženým vyhodnocením o šíři poskytovaných dat. Vyhodnocení dat prokázalo stejnou přesnost pro využití 2D i 3D systému a možnost kontrolovat kvalitu spoje vyhodnocováním kontrolních rozměrů v provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

přírubový spoj, optické měření, utahování, teplotní zatížení, posuvy

ABSTRACT

The diploma thesis addresses the topic of optical measurements of flange joints during tightening and thermal loading. Commercially available optical systems with decreasing invasiveness were compared in opportunity which offer to an industrial environment. Various conditions are evaluated in 3D (scanning, DIC) as well as in 2D (DIC). The data for evaluation of sensitivity and system accuracy together with the evaluation of the data range were obtained by the measurement. Data evaluation showed the same accuracy for 2D and 3D system and the possibility of quality inspection of the joint by assessing the inspection dimensions in operation.

KEYWORDS

flange joint, optical measurement, tightening, thermal loading, displacement

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHMIDTOVÁ, Markéta. *Optické měření deformací přírubových spojů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129672>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Jakub Hurník.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala mému vedoucímu Ing. Jakubovi Hurníkovi za jeho vedení a rady při zpracování práce.

Dále bych chtěla poděkovat Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, Ph.D. za jeho ochotu a čas. K tomu přikládám i poděkování společnosti MCo, spol. s r.o. a to zejména Ing. Pavlovi Svobodovi za zpracování výpočtu.

Velké poděkování patří i společnosti MCAE Systems, s.r.o. za veškeré zapůjčené vybavení. Jmenovitě především Alexandrovi Zaklovi a Ing. Markovi Blažovi.

Mé poslední poděkování patří doc. Danielovi Koutnému za jeho podporu během celého mého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Jakuba Hurníka. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Konvenční metody kontroly přírubových spojů	15
2.1.1	Kontaktní měřidla	16
2.1.2	Tlakové zkoušky	16
2.1.3	Ultrazvuková sonda	17
2.1.4	Softwarová analýza	17
2.2	Optická inspekce šroubových spojů	19
2.2.1	Skvrnová interferometrie	19
2.2.2	Digitální korelace obrazu	21
2.2.3	Detekce objektů	26
2.3	Vliv vysoké teploty na přírubové spoje	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	30
3.1	Analýza problému	30
3.2	Cíl práce	32
4	MATERIÁL A METODY	33
4.1	Postup řešení	33
4.2	Optické systémy	33
4.2.1	Skener Atos Triple Scan	33
4.2.2	Skener Aramis	34
4.2.3	Kamera ZWO ASI1600MM	35
4.2.4	Fotoaparát (Tritop)	35
4.3	Vyhodnocení dat	36
4.3.1	Matlab R2019b	36
4.3.2	Tritop	36
4.3.3	GOM Inspect Professional	36
4.3.4	GOM Aramis	37
4.3.5	GOM Aramis Siluety	37
4.3.6	GOM Correlate	37
4.4	Podmínky a průběh experimentu	38
4.4.1	Příruba	38
4.4.2	Postup měření	38
4.4.3	Vyhodnocení	41

4.4.4	Úprava povrchu	43
4.4.5	Experimentální zařízení	45
4.4.6	Porovnávací výpočet	48
5	VÝSLEDKY	49
5.1	Sken (GOM Inspect)	49
5.1.1	Barevná mapa	49
5.1.2	Polární grafy	50
5.1.3	Posuvy	52
5.2	3D (GOM Aramis)	53
5.2.1	Mapa posuvů	53
5.2.2	Posuvy	54
5.2.3	Rotace příruby	54
5.2.4	Vektory posuvů na šroubu	55
5.3	2D Radial (Correlate)	56
5.3.1	Barevná mapa	58
5.3.2	Posuvy	60
5.3.3	Rotace příruby	60
5.4	2D Siluety (Aramis)	61
5.5	Srovnání metod	63
5.5.1	Srovnání vyhodnocení přiblížení přírub	63
5.5.2	Srovnání vyhodnocení stlačení těsnění	64
5.5.3	Srovnání vyhodnocení posuvů na šroubu	66
5.5.4	Srovnání vyhodnocení rotací přírub	69
5.5.5	Srovnání vyhodnocení pomocí lepených bodů a bodů vytvořených ze skvrnitého vzoru	72
6	DISKUZE	74
7	ZÁVĚR	76
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	77
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	80
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	82
11	SEZNAM TABULEK	86
12	SEZNAM PŘÍLOH	87
12.1	Externí přílohy	88

1 ÚVOD

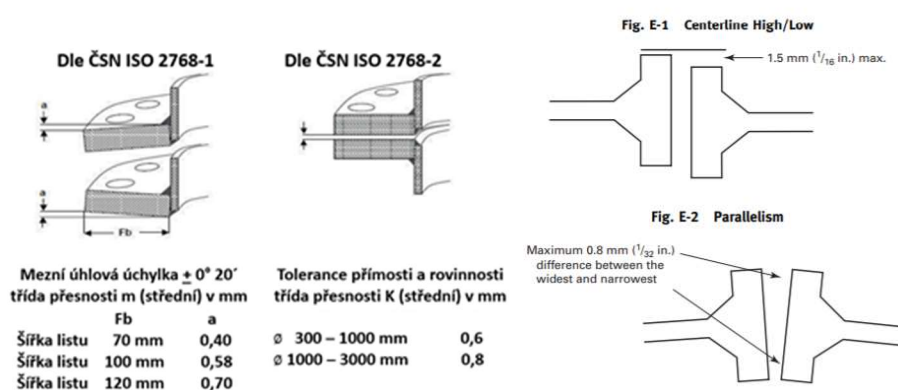
Přírubové spoje jsou často využívány v extrémních podmínkách (vysoký tlak, toxické médium), a proto musí být zajištěna jejich bezpečnost, která je dána především těsností spoje. Tu ovlivňují mimo jiné provozní podmínky a s nimi spojené deformace spoje například kvůli vysoké teplotě. Konvenční metody využívané k zajištění předpětí, jakými jsou například utahování pomocí momentového klíče nebo monitoring pomocí tenzometrů, mají řadu nevýhod – nejsou dostatečně přesné, nejsou vhodné z hlediska přípravy či prostoru pro zástavbu.

Vedle konvenčních metod sledování deformací se s vývojem počítačových a optických systémů začaly rozvíjet bezkontaktní optické metody. Ty otevřely možnosti ke zkoumání vlivů, které jsou běžnými metodami neměřitelné. Jejich aplikaci do konkrétních průmyslových odvětví musí předcházet definování možností a požadavků jednotlivých systémů. Vzhledem k tomu, že existuje mnoho optických metod, tak je nutné vybrat vhodnou variantu pro konkrétní účely, které budou odlišné, pokud porovnáme například online monitoring v průmyslu s vývojovým testováním.

Hlavním cílem práce je definování možností využití optických metod pro měření přírubových spojů, které v praxi umožní kontrolu stavu příruby během kritických provozních podmínek.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

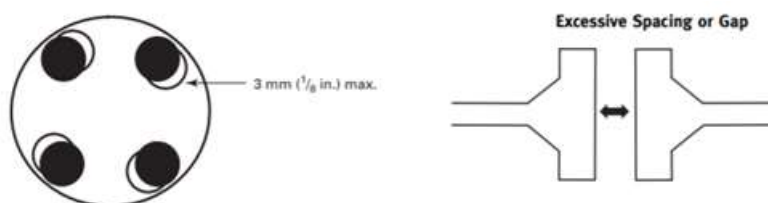
Vzhledem k tomu, že jsou přírubové spoje používány i v aplikacích s toxickými látkami nebo vysokým tlakem, je nutné zajistit jejich funkčnost z hlediska těsnosti, aby nedocházelo k úniku vedeného média a případné kontaminaci okolí. Normy vztahující se k přesnosti výroby jsou ČSN ISO 2768-1 „Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchytky délkových a úhlových rozměrů“ [1] a ČSN ISO 2768-2 „Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance“ [2] určující maximální možné odchylky rovnoběžnosti pro těsnící plochy. Novější norma ASME PPC-1-2010 „Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly“ [3] určuje tolerance rovnoběžnosti a sousosti před sestavením příruby.



Obr. 2-1 Norma ČSN (vlevo) a ASME (vpravo).[1–3]

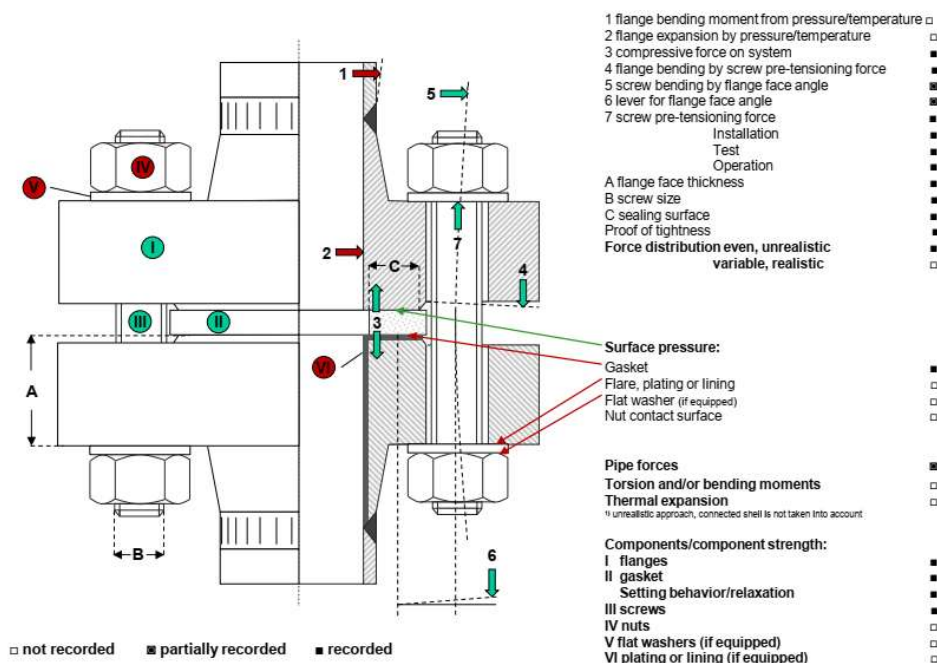
I přes stále se zvyšující požadavky na bezpečnost a tím i na normalizování postupů jsou smontované přírubové spoje hodnoceny pouze z hlediska kvalifikace (certifikace) personálu. Pro rozebíratelné spoje, tedy i přírubové, byla v roce 2014 vydána norma ČSN EN 1591-4 „Kvalifikace odborné způsobilosti personálu k montáži šroubových spojů v tlakových zařízeních v kritických aplikacích“ [4], která by měla zajistit především dodržení technologických postupů a tím i správné smontování z hlediska počítaných utahovacích momentů.

V důsledku nevhodné montáže dochází ke snížení celkové síly sevření spoje, protože nadměrná síla použitá k zajištění těsnění dosedových ploch v důsledku nepřesností (Obr. 2-1) nebyla předem zahrnuta do potřebných výpočtů.



Obr. 2-2 Pootočení děr pro šrouby (norma ASME). [3]

Výpočet přírubového spoje je dán normou ČSN EN 1591-1 „Příruby a přírubové spoje - Pravidla pro navrhování těsněných kruhových přírubových spojů - Část 1: Výpočet“ [4]. Norma definuje požadavky jak na těsnění, tak konstrukci celého přírubového spoje. Sledované a vyhodnocované parametry (naklopení přírub, stlačení těsnění nebo dilatace svorníků) jsou schématicky zobrazeny na Obr. 2-3. Možnosti ověření nebo dosažení těchto parametrů je popsáno v kapitole 2.1.



Obr. 2-3 Parametry podle normy ČSN EN 1591-1.[4]

2.1 Konvenční metody kontroly přírubových spojů

Vzhledem k faktu, že jsou přírubová spojení často využívána na vysokotlakých nádobách nebo v aplikacích s toxickými látkami, musí být zajištěna jejich absolutní těsnost. K její ztrátě může dojít kvůli špatnému předpětí spoje, ke kterému až z 90 % [5] dochází vlivem špatné utahovací síly. Samotná montáž, a tedy hlavně utahování šroubů, může být provedeno několika způsoby podle vnitřních norem společností.

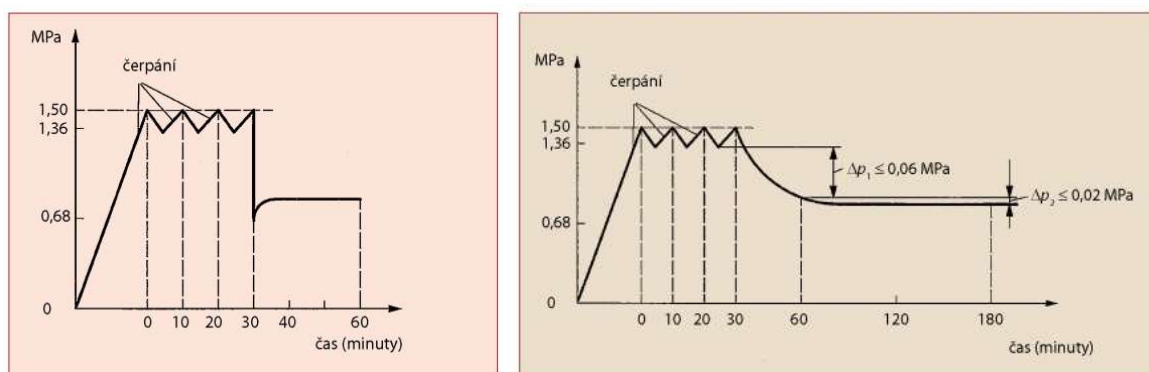
2.1.1 Kontaktní měřidla

Prvním způsobem měření utahovacího momentu na požadovanou předem napočítanou hodnotu je za použití momentových klíčů. Největší nevýhodou je odchylka až $\pm 50\%$ vlivem tření [6], které mění vztah mezi utahovacím momentem a napětím. Další způsob kontroly je měření prodloužení šroubů za využití mikrometrů nebo tenzometrů. Poslední metodou může být využití hydraulických napínáků nebo měřidel s vnitřním kolíkem (Obr. 2-7), které poskytují velice přesné hodnoty pro měření předpětí. Jejich nevýhodou ale je, že vyžadují velký manévrovací prostor. Tyto kontaktní metody za přítomnosti obsluhy jsou sice dostatečně přesné, ale nemůžou se z bezpečnostních důvodů provádět za zvýšené teploty. Tenzometry mohou být použity za vyšších teplot, ale získávané hodnoty jsou z konkrétního místa, a zároveň může být odrazující jejich pořizovací ceny při úvaze množství spojů v provozu.

2.1.2 Tlakové zkoušky

Podle stanov společnosti UNIPETROL, a. s. probíhá kontrola smontovaných přírubových spojů nejprve vizuálně [7], kdy pracovník hledá mechanické poškození, poškození vlivem koroze, deformace těsnění nebo uvolnění uložení. Po provedení všech požadovaných základních kontrol je testována těsnost vodou, dusíkem nebo provozním médiem na maximální provozní tlak nebo na nastavení pojistného ventilu.

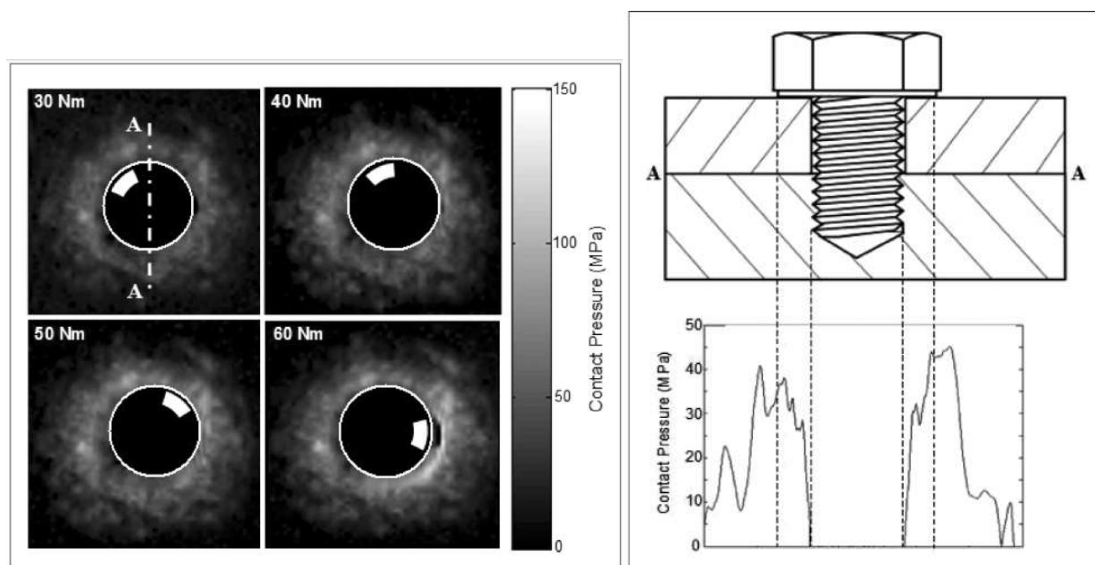
Postup tlakové zkoušky pro montáž vnitřních vodovodů je dán normou ČSN EN 806-4 „Vnitřní vodovody pro rozvod vody určené k lidské spotřebě - Část 4: Montáž“ [8]. Postup je definován následovně: Nejprve se systém naplní vodou, odvzdušní a následně dočerpá na požadovaný přetlak 15 bar a ten se udržuje po dobu 30 min. Poté se buď (postup A) tlak sníží a následujících 60 min nesmí dojít k žádnému poklesu anebo (postup B) se měří přirozený pokles tlaku. Během prvních 30 min je maximální přijatelný pokles definován na 0,6 bar a v následujících 120 min už jen 0,2 bar. Oba postupy jsou graficky znázorněny na Obr. 2-4.



Obr. 2-4 Grafické znázornění postupů při tlakové zkoušce (A vlevo, B vpravo). [8]

2.1.3 Ultrazvuková sonda

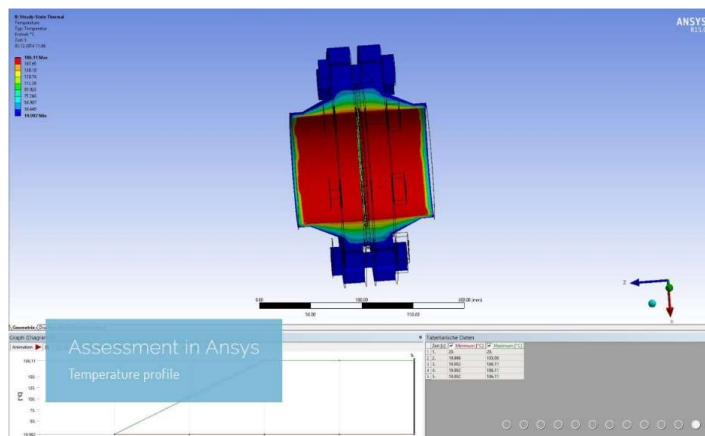
Firma SEPS, a.s. zabývající se revizemi potrubních systémů nabízí defektoskopickou NDT (nedestruktivní testování) kontrolu pomocí ultrazvukové metody Phased Array [9]. Technologie využívá sondy, vyzařující svazek ultrazvuku s postupnou změnou úhlu. Touto metodou je hodnocen, jak stav těsnících ploch, tak i šroubů a svorníků bez nutnosti jakékoli demontáže. Výsledky zkoušky jsou zobrazeny na Obr. 2-5. Hlavní omezení metody je nutnost obsluhy během měření, což by při vysokých teplotách znamenalo měření v jedné pozici nebo vytváření dálkového ovládání.



Obr. 2-5 Zobrazení výsledného kontaktního tlaku pro různé utahovací momenty (vlevo) a rozklerslení průběhu tlaku v řezu pro 30 Nm (vpravo). Měřeno ultrazvukem. [10]

2.1.4 Softwarová analýza

Software ®flangevalid [11] využívá metodu konečných prvků k analýze přírubových spojů. Díky tomuto programu je možné, jak spoj analyzovat, tak také navrhovat s pomocí databází obsahujících mnoho druhů základních prvků jako jsou těsnění nebo šrouby. Analýza je prováděna jako 3D úloha v prostředí ANSYS Workbench zahrnující různé stavy zatížení, včetně montážního nebo teplotního (Obr. 2-6).



Obr. 2-6 Teplotní analýza příruby (flangevalid). [11]

Komplexní analýzu [12] včetně návrhového softwaru s databázemi prvků nabízí i společnost Amtec Corporation. Při následném smontování navržených přírub je hodnoceno prodloužení šroubů pomocí bezdrátových měřidel s vnitřním kolíkem připevněných na maticích (Obr. 2-7).



Obr. 2-7 Měření prodloužení pomocí kolíků (Amtec). [12]

I přes to, že analýzy využívající metodu konečných prvků mají přesné popisy nelineárního chování a zavedené modely nelineární sítě pro lepší popis pohybu těsnících ploch, tak jsou zatíženy chybou v důsledku zanedbání relaxace materiálu nebo velikosti jeho zrn. Bylo prokázáno [13], že tato nepřesnost vede k podhodnocování reálných hodnot deformací a tím i vzniklých netěsností.

2.2 Optická inspekce šroubových spojů

Protože v reálných podmínkách není vždy možné použít některou z konvenčních metod měření přírubových spojů například z důvodů zmíněných v kapitole 2.1, tak se zvyšuje poptávka po optických metodách umožňující ověření provozuschopnosti. Vývoj technologií přináší nové možnosti měření přírubových spojů, které umožňují zkoumat jevy neměřitelné konvenčními metodami či přesnější ověření numerických modelů s reálnými tělesy. To umožňuje zkoumat vliv různých typů zatížení na deformace vzniklé ve spojkách. Jednotlivé metody optické inspekce jsou popsány v následujících kapitolách.

2.2.1 Skvrnová interferometrie

Měření probíhá pomocí vysílaného paprsku světla na nerovný povrch součásti, který při odrazu do snímáče vytvoří skvrnitý vzor povrchu (Obr. 2-8). Rozdíly mezi těmito vzory odpovídají rozdílům při zatěžování. [14]

- [14] Výzkum rovinných napětí na šroubových přírubových spojkách pomocí skvrnové interferometrie (Investigation of in-plane stresses on bolted flange joints using digital speckle pattern interferometry)

Autoři publikace sledují vliv utažení jednotlivých šroubů ve spoji na plochách spojovaného materiálu pomocí optického měření. Tím definují vliv rozdílů v utahovací síle ve skupinách šroubů na výsledné rozložení kontaktního tlaku.

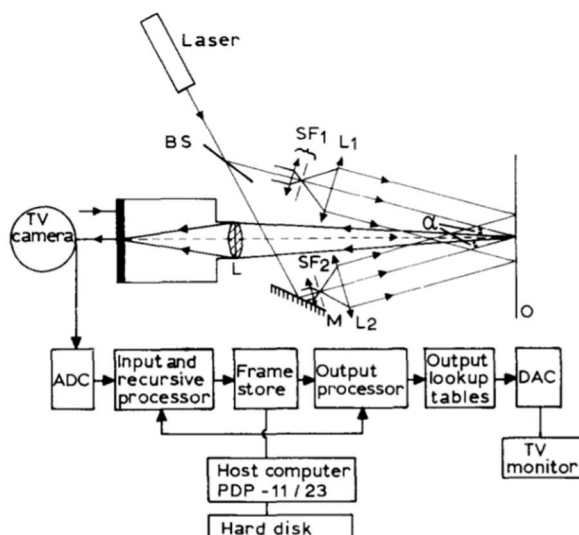
Materiál a metody:

měřená plocha součásti, využit laser a kamera s CCD čipem (512×512 pixelů)

Autoři testovali vliv různé konfigurace utažení šroubů na těsnost spoje.

Výsledky a závěr:

Při experimentu bylo prokázáno, že pokud je jeden šroub méně utažený než ostatní, tak je oblast náchylná k netěsnostem, protože napětí generované okolními šrouby nepokryje celou oblast. V opačném případě, kdy je jeden šroub utaženější, nebyla prokázána významná deformace příruby vedoucí k nefunkčnímu stavu.



Obr. 2-8 Schéma měření pomocí skvrnové interferometrie (O-měřený objekt, L-čočky). [14]

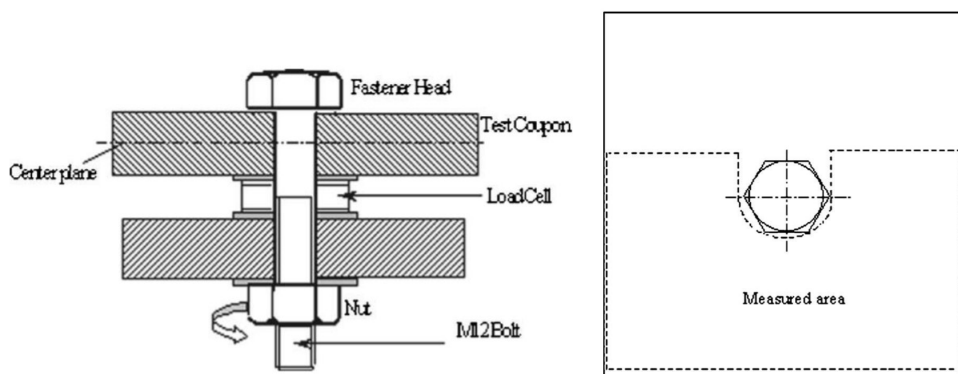
- [6] Optické monitorování utahování šroubů pomocí skvrnové interferometrie (Optical monitoring of bolt tightening using 3D electronic speckle pattern interferometry)

Experiment sleduje povrchové deformace v blízkém okolí šroubu, ze kterých se vyhodnocuje síla šroubového spoje.

Materiál a metody:

měřená plocha součásti, využit laser a kamera s CCD čipem (neuvedeno blíže)

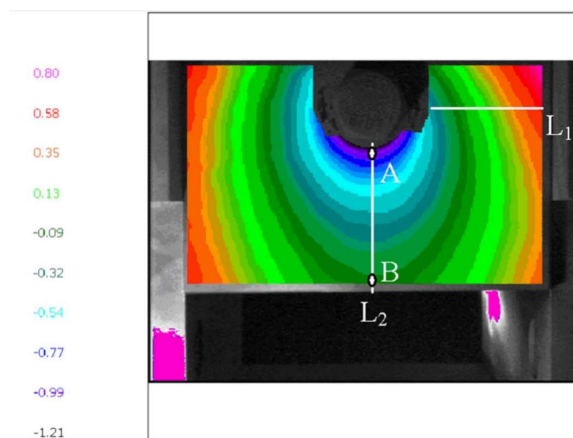
Šroubový spoj byl tvořen ze dvou ocelových desek spojených šroubem M12. Na desce byla sledována distribuce deformace šířící se vlivem utahování šroubu. Jednošroubový spoj byl použit, aby bylo možné vyhodnocení korelace mezi zatížením a deformací.



Obr. 2-9 Konfigurace spoje (vlevo) a měřená oblast (vpravo). [6]

Výsledky a závěr:

Z těchto měření byla určena závislost mezi vykreslenými deformacemi (utahovacím momentem) a napětím, které bylo sekundárním výstupem z měření. Tyto výsledky byly porovnávány s analýzou pomocí metody konečných prvků. Bylo stanoveno, že pomocí monitorování plochy v okolí šroubového spoje je možné opakovaně dosáhnout potřebného předpětí.



Obr. 2-10 Rozložení deformace získané ze skvrnové interferometrie (μm). [6]

2.2.2 Digitální korelace obrazu

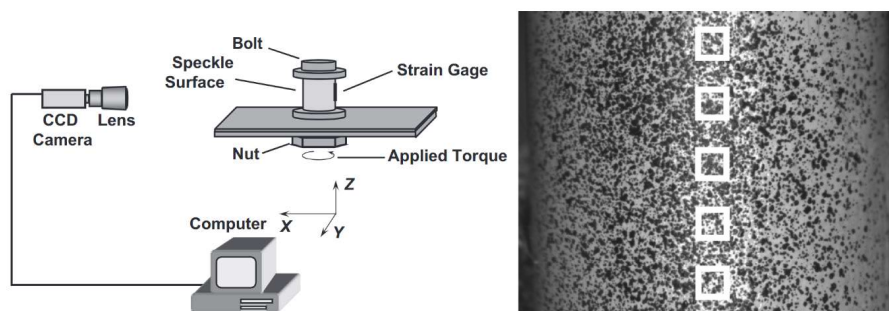
Základním principem digitální korelace obrazu (DIC) je vyhodnocování rozdílů snímků s nastříkaným stochastickým vzorem. Buď se porovnává pouze první a poslední obraz nebo dochází k průběžnému výpočtu během zatěžování. Jde tedy o nalezení identických míst snímcích jdoucích po sobě. Rozdílem těchto poloh je definována deformace a následně jsou vyhodnocovány např. materiálové vlastnosti vzorku. Sledovaná oblast je tedy rozdělena na fazety (subsety) o konkrétní velikosti (pixely) a následně se mezi jednotlivými snímky hledá maximum korelační funkce. [15–17]

- [18] Monitorování upínací síly šroubového spoje pomocí digitální korelace obrazu v reálném čase (Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation)

Autoři publikace měří deformace na hladkých površích šroubového spoje pomocí digitální korelace obrazu. Z naměřených hodnot vyhodnocují sílu působící na šroub. Ta je porovnávána s hodnotami naměřenými pomocí tenzometrů.

Materiál a metody:

2D, měřena podložka pod šroubem, využita kamera s CCD čipem (1280×1024 pixelů)



Obr. 2-11 Schéma měření s využitím DIC (vlevo) a skvrnitý vzor na podložce (vpravo). [18]

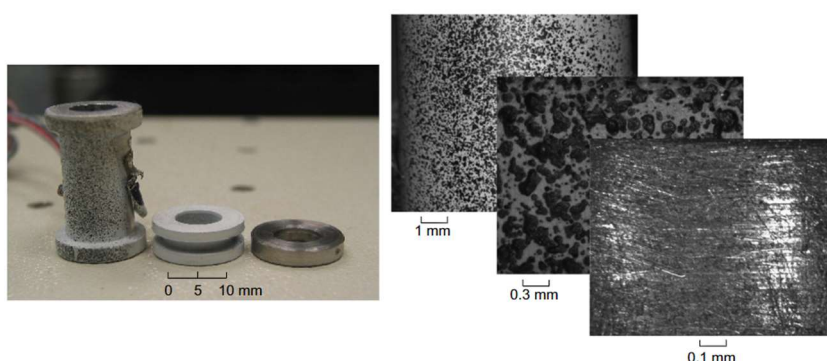
Cílem experimentu bylo vytvořit systém (Obr. 2-11) vyhodnocující sílu působící na šroubovaný spoj a tím docílit požadované hodnoty předpětí. Výsledky byly porovnávány s hodnotami naměřenými tenzometry (Obr. 2-12), které byly použity v konfiguraci s dostatečně velikou podložkou, která se ale v praxi nepoužívá. Využitelnost v provozu mělo prokázat měření s běžnou podložkou, na kterou již ale nemohl být nalepen tenzometr. V tomto případě nebylo ani možné vytvořit potřebný kontrastní vzor, místo něho bylo využito přirozených detailů na součásti při dostatečném přiblížení (Obr. 2-12).

Tab. 2-1 Porovnání hodnot posuvů (v μm) měřených tenzometrem a DIC.

Metoda měření	Posuv	Posuv	Posuv	Posuv	Posuv	Posuv
Tenzometr	0	-103	-206	-318	-418	-537
DIC	0	-107	-200	-306	-415	-524
Tenzometr	-640	-693	-743	-801	-895	-978
DIC	-630	-676	-751	-794	-895	-1008

Výsledky a závěr:

Testováním byl prokázán potenciál metody jakožto online kontroly při utahování šroubových spojů, jak s vytvořeným vzorem, tak s využitím detailů materiálu při dostatečném přiblížení.



Obr. 2-12 Velikosti použitých podložek (vlevo) a detail vzoru využitý k DIC (vpravo). [18]

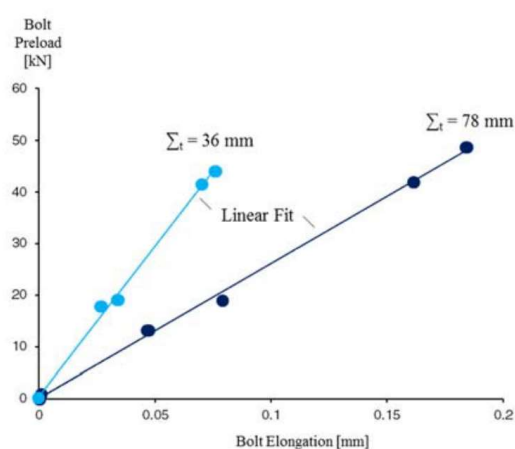
[19] Modelová studie předpětí šroubů pomocí digitální korelace obrazu (Model Based Bolt Preload Monitoring Using Digital Image Correlation)

Studie testuje využití digitální korelace obrazu pro vyhodnocení předpětí šroubového spoje při monitoringu v reálném čase za použití prvků využívaných v praxi (nezvětšené podložky).

Materiál a metody:

3D, měření volný konec šroubu, využita digitální kamera (2752×2206 pixelů)

Pomocí digitální korelace obrazu bylo sledováno prodloužení utahovaného šroubu, respektive jeho volného konce, který byl zmatněn a následně nastříkán kontrastní barvou pro vytvoření náhodného skvrnitého vzoru.



Obr. 2-13 Závislost mezi prodloužením šroubu a předpětím pro délku šroubu 36 mm a 78 mm. [19]

Výsledky a závěr:

Experiment prokázal, že k vyhodnocení předpětí je dostatečné zaznamenávání pouze prodloužení volného konce šroubu za použití digitální korelace obrazu. Ověření funkčnosti metody proběhlo analýzou dat, u kterých byla prokázána lineární regrese mezi prodloužením šroubu a předpětím pro rozsah studovaných upínacích délek (Obr. 2-13).

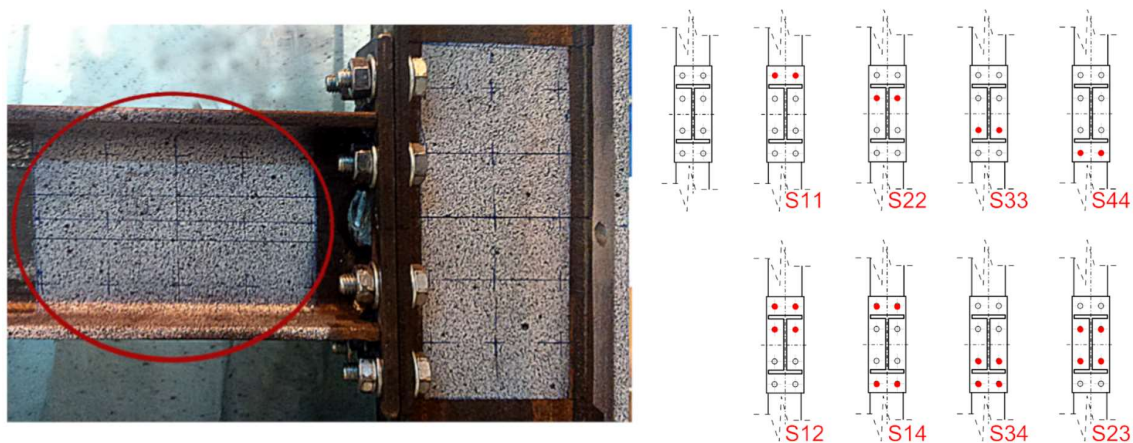
[20] Detekce anomálií v předepjatém šroubovém spoji nosníku pomocí digitální korelace obrazu a neutrálních sítí (Detection of Anomaly in a Pretensioned Bolted Beam-to-Column Connection Node Using Digital Image Correlation and Neural Networks)

Experiment zaznamenává vysokorychlostní kamerou oblast nosníku v blízkosti šroubového spoje při zatížení vibracemi. Z vyhodnocených posuvů jsou zpětně vyhodnocovány špatně utažené šrouby.

Materiál a metody:

3D, měřena plocha nosníku v blízkosti spoje, využity digitální kamery (2752×2206 pixelů)

Bylo testováno několik konfigurací s různým utažením šroubů. Na obrázku (Obr. 2-14) jsou vidět skupiny šroubů, které byly postupně během měření nedotaženy. Během vibračního buzení na 10 % hodnoty vlastní frekvence systému byly vyhodnocovány 2D posuvy podle svislé a vodorovné osy.



Obr. 2-14 Vyhodnocovaná oblast pomocí DIC (vlevo) a konfigurace nedotažených šroubů (vpravo). [20]

Výsledky a závěr:

Metoda detekce anomálií (nedotažených šroubů) využívající digitální korelaci obrazu byla úspěšná v 80 % případů. V případě zahrnutí vlivu rotace vzrostla úspěšnost na 94 % v určování počtu dvojic šroubů a na 95 % v určení jejich polohy. Autoři se shodují, že je metoda vhodná do konkrétních aplikací v provozu s omezeným manévrovacím prostorem a špatnou dostupností sledovaného uzlu.

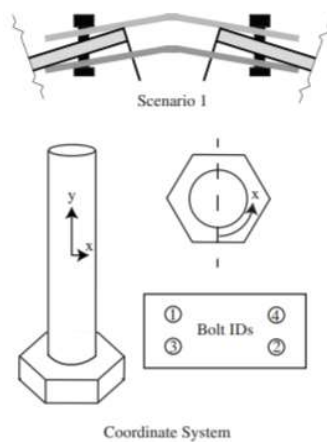
- [21] Nastavitelné šroubové spojení na ocelových deskách: Měření chování šroubů během utahování spojené s numerickým parametrickým výpočtem (Adjustable Bolted Steel Plate Connection: Measured Behavior of Bolts during Field Installation and Numerical Parametric Investigation)

Autoři článku zkoumají vliv různých úhlů desek spoje (Obr. 2-15) a způsobů instalace (utahování do kříže, proti směru a po směru hodinových ručiček) mimo jiné na výsledné zbytkové napětí ve šroubech.

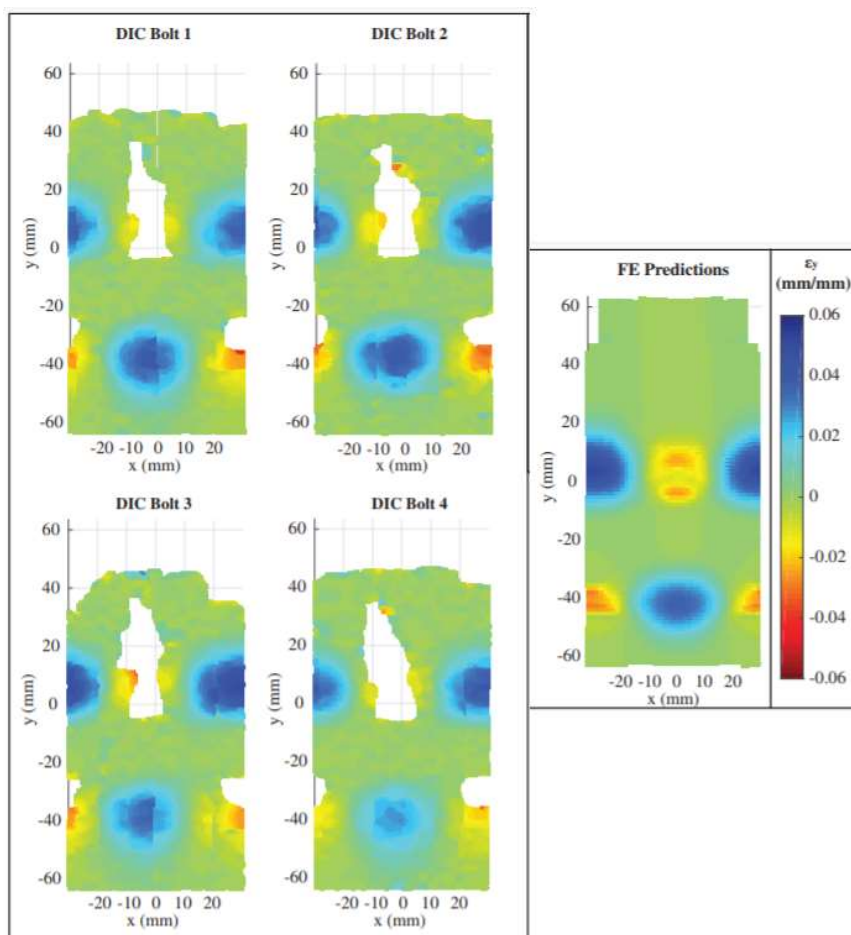
Materiál a metody:

3D, měřen povrch závitové části šroubu, neuvedeno

Šrouby byly foceny během utahování a poté i po něm, aby bylo možné vyhodnotit zbytkové napětí. Aby bylo možné povrch sledovat, tak na něj byl pomocí spreje na kovové značení a laseru vyleptán skvrnitý náhodný vzor.



Obr. 2-15 Měřená konfigurace č. 1. [21]



Obr. 2-16 Porovnání mapy napětí vyhodnocené pomocí DIC (vlevo) a MKP (vpravo) při konfiguraci č. 1. [21]

Výsledky a závěr:

Z naměřených hodnot byly vytvořeny plošné rozvinuté mapy zbytkového napětí, které byly porovnány s modelem vytvořeným pomocí MKP. Prázdná místa vznikla v důsledku abrazivního poškození vzoru během tlakového zatížení. Podle obrázků je zřejmá shoda obou použitých přístupů. Šum měřený před zatížením určuje přepočítanou hodnotu možné odchylky na 0,06 mm.

2.2.3 Detekce objektů

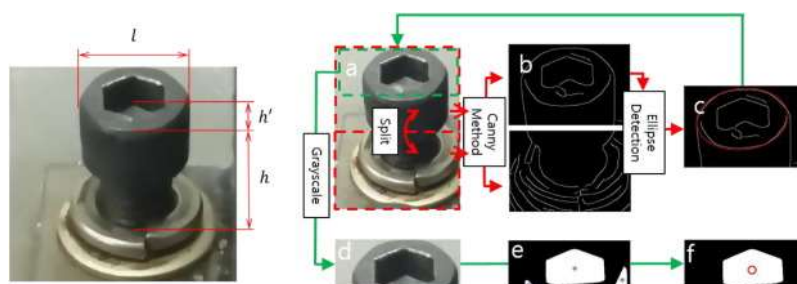
Houghova transformace je metoda, která z analytického popisu definuje parametrický popis objektů pomocí základních, jednoduchých prvků jako přímky, kružnice nebo elipsy. Metoda je stabilní vůči nepravidelnostem nebo porušení u hledaných křivek [22].

[23] Optická detekce uvolněných šroubů používající Houghovu transformaci a metodu podpůrných vektorů (Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines)

Autoři se zaměřují na monitorování a detekování uvolněných šroubů v jejich předem známém seskupení.

Materiál a metody: 2D, měření šroub, použit mobilní fotoaparát (4128×2322 pixelů)

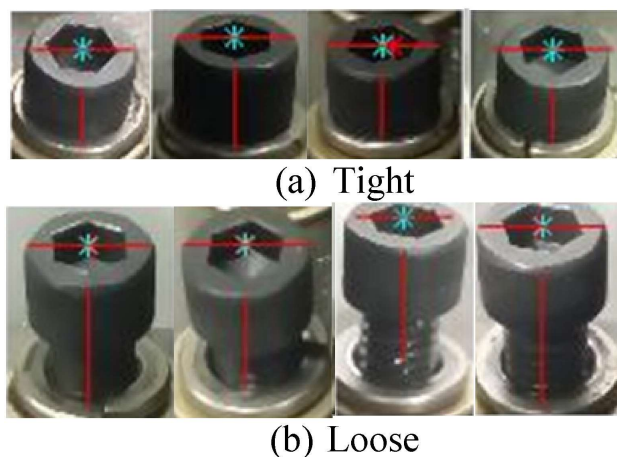
Skupina šroubů byla focena fotoaparátem a v reálném čase zasílána na vyhodnocení. Pokaždé byly šrouby jinak zašroubovány a systém měl pomocí detekce hran určit, které jsou uvolněny a které pevné.



Obr. 2-17 Klíčové porovnávané rozměry (vlevo) a detekce středového bodu a zobrazené elipsy (vpravo).[23]

Výsledky a závěr:

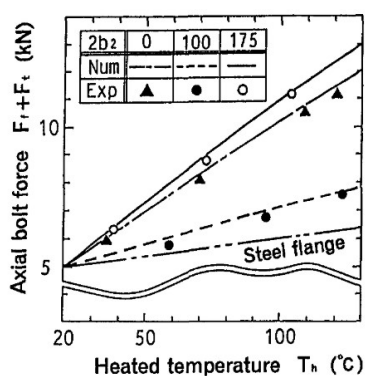
Využití mobilního fotoaparátu má omezení v úhlu a vzdálenosti snímání, ale bylo prokázána 95% přesnost vyhodnocení testovacích dat s tímto rozlišením. Je nutné podotknout, že šrouby byly během experimentu uvolněny, a ne pouze nedotaženy, což je omezení pro reálný provoz.



Obr. 2-18 Vyhodnocení uvolněných (b) a utažených (a) šroubů. [23]

2.3 Vliv vysoké teploty na přírubové spoje

Studie [24] prokázala, že při navýšení teploty se zvyšuje napětí ve šroubech (Obr. 2-19), které ovlivňuje kontaktní tlak přenášený na přírubový spoj.



Obr. 2-19 Graf závislosti axiální síly na rostoucí teplotě při porovnání experimentálních (Exp) a vypočítaných (Num) dat (2b2 0-bez těsnění, 100- poloviční plocha, 175 plné těsnění). [24]

Vliv relaxace (Obr. 2-20) a tečení byl popsán při experimentu [25], který porovnával tloušťku těsnění nebo velikost zatížení s délkou relaxace. Během doby relaxace a změny zatížení šroubů vznikají netěsnosti vlivem ztráty kontaktů [25, 26].

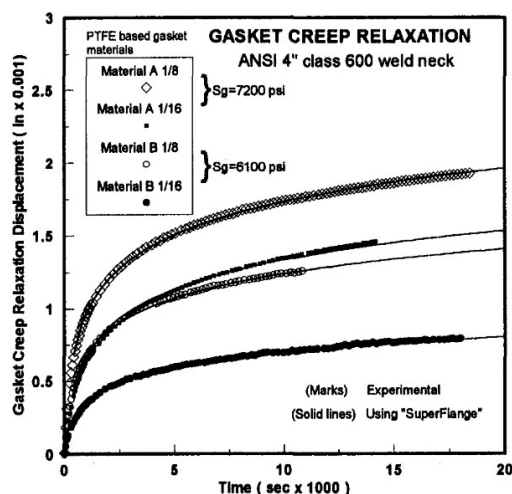


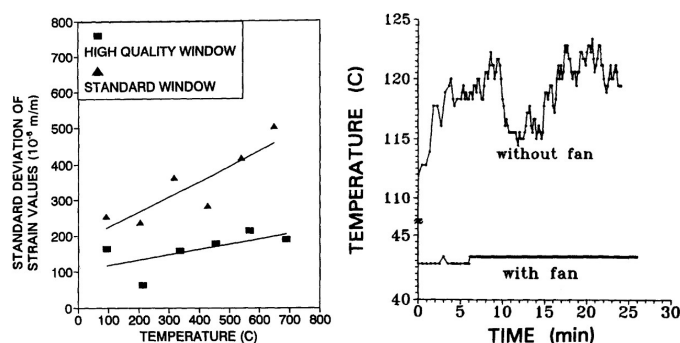
Fig. 8 Gasket creep relaxation

Obr. 2-20 Průběh relaxace těsnění v čase (teflonová těsnění).[25]

Optické měření deformací za vysoké teploty

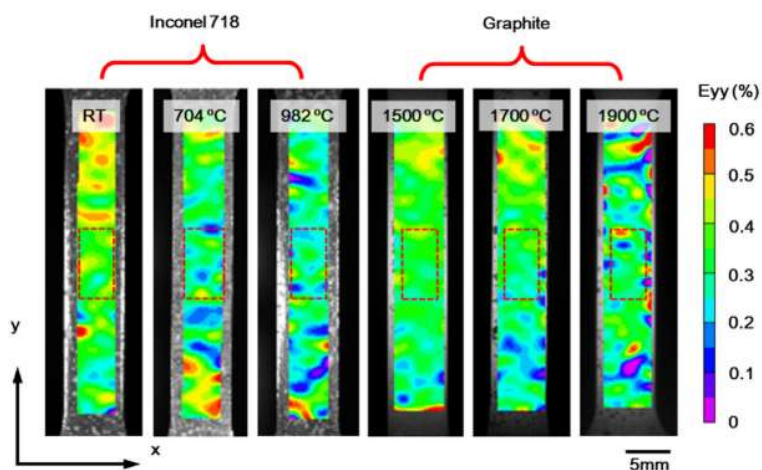
V minulosti byly pro optická měření deformací za vysoké teploty využité různé metody zahrnující mimo jiné digitální korelaci obrazu. Zaznamenání deformací způsobené vlivem teploty umožňuje i digitální korelace obrazu použitá v několika studiích a to i pro extrémně vysoké teploty (až 2000 °C).

Výzkum využitelnosti DIC z roku 1996 [27] testoval měření při teplotě 650 °C. Teploty se dosahovalo zahříváním zkušební vzorku v peci s proskleným otvorem, čímž vznikala nepřesnost kvůli změně lomu světla zahřátým vzduchem a díky nedostatku turbulentního proudění. Pokud bylo použito kvalitní sklo a nahřátý vzduch byl směrem k ohnisku kamery rozdmýcháván se studeným (Obr. 2-21), tak bylo dosaženo výsledků o stejné přesnosti jako při pokojové teplotě. Během pořizování snímků byl vzorek osvětlen bílým světlem.



Obr. 2-21 Rozdíl ve velikosti odchylky vlivem použitých skel (vlevo) a teplota vzduchu ve vzdálenosti 3 mm od skla směrem ke kameře bez a při použití ventilátoru pro rozdmýchání vzduchu(vpravo). [27]

Metoda byla použita i pro měření super slitin nebo kompozitních materiálů používaných například v leteckém průmyslu (Obr. 2-22). Ve studiích [28, 29] byla prokázána funkčnost metody i při 2000 °C, kde bylo nutné kontrastní vzor povrchu vytvořit za použití keramického prášku a snímky pořizovat za osvětlení modrým světlem, aby nedocházelo ke zkreslení v důsledku emitace záření a tím pádem změny kontrastu povrchu.



Obr. 2-22 Výsledné zobrazení posuvů při různých teplotách na vzoru z keramického prášku. [28]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Konvenční zkoušky testování přírubových spojů za zvýšené teploty jsou velmi drahé a nemohou být provedeny v provozu jako monitoring. V aplikacích, kde se přírubové spoje zahřívají na vysoké teploty, dochází vlivem deformací a relaxace materiálu ke ztrátě těsnosti kvůli změně působící síly a tím i kontaktního tlaku.

Pro zajištění dostatečného předpětí šroubového spoje je nutné určit síly vznikající během tepelného zatěžování a zahrnout je do návrhu spoje. I přes to, že výpočty metodou konečných prvků pracují s nelineárními materiály a nelineárními úlohami, mohou výsledky, které z nich zadavatel obdrží, podhodnocovat šroubový spoj z důvodu nemožnosti zahrnout další proměnné, jako např. velikost zrn nebo relaxaci materiálu [13]. Toto podhodnocení vede k definování špatné utahovací síly, která až z 90 % [5] může za netěsnost spoje. V případě, že příruba není vystavena tomuto druhu zatížení a výpočet utahovací síly není zatížen touto chybou, tak má zásadní vliv způsob utahování, kde při použití momentového klíče může dojít vlivem tření až k 50% [6] odchylce od požadovaného momentu.

Konvenční metody na měření utahovací síly nejsou vhodné do všech aplikací. Veškeré kontaktní metody vyžadují obsluhu, a tudíž nemohou být z bezpečnostních důvodů provedeny za vysoké teploty. Tenzometry mohou být u vyšších teplot použity, ale jejich hlavní nevýhodou je snímání hodnot v jednom konkrétním místě. Studie [14] prokazuje, že pokud je v oblasti jednoho šroubu nižší napětí vlivem nedotažení, tak se celý spoj stává netěsným, protože okolní šrouby, dostatečně utažené, nedokážou těsnost spoje zajistit. Nelze tedy dělat závěry pouze z jednoho místa měření.

I z těchto důvodů se v dnešní době rozšiřuje využívání optických metod pro sledování deformací, které mohou být převáděny na velikost utahovací síly nebo přímo kontaktního tlaku. Některé měřicí systémy jsou příliš robustní (skenery) na využití v omezených provozních podmínkách nebo mají složitější technologii vyžadující například externí zdroje světla (skvrnová interferometrie) aj. Je proto nutné najít řešení schopné detekovat požadované změny, které nebude limitováno provozními podmínkami.

Ze studií plyne, že výsledky při různých konfiguracích měření poskytují jak 2D systémy, tak 3D systémy. Pro jednoduchost v provozu je preferovanější záznam pouze z jedné kamery, ale 3D systém může přinést více dat a tím i hlubší porozumění problematice.

Klíčové pro získávání potřebných dat je zaměření na konkrétní členy nebo plochy spoje. Záznamy pracující s geometrií šroubu mohou být reálně problematické kvůli složitosti přípravy (příprava povrchu až po sešroubování například kvůli distribuci maziva a tím možného znehodnocení vzoru) [19] nebo nutnosti velkých posuvů [23] pro detekci chyby ve spoji (šroub nebyl v ověřovacím experimentu povolen, ale vyšroubován).

Nicméně možnosti, které tyto studie nabízí jsou nezanedbatelné. Zjednodušení zaznamenávání dat v provozu v podobě fotografií z dnes běžných fotoaparátů chytrých telefonů [23] přináší možnosti okamžitého vyhodnocení díky internetovému přenosu dat. Řešení [18] problematiky velikosti nebo složitosti součásti na přípravu povrchového vzoru nabízí ověření možnosti měření deformací v dostatečném přiblížení pomocí přirozených detailů materiálu místo vytváření skvrnitého povrchu, což v některých případech může vést k řešení u konkrétních aplikací nebo experimentálního výzkumu. Přínosem je i fakt, že vyhodnocováním snímků [19] pomocí digitální korelace obrazu byla prokázána závislost mezi měřeným prodloužením šroubu na volném konci a jeho předpětím. Možným řešením složitosti [21] přípravy při potřebě měření na šroubu může být studie měřící deformace vzorem, který byl na šroubovici vyleptán a tudíž nebyl náchylný na zničení na nezátížených částech.

I z důvodů uvedených výše se nabízí využití snímání větších rovinných ploch, které nejsou v přímém kontaktu při utahování. V článku [6] je uveden experiment, který využívá do praxe ne příliš vhodnou skvrnovou interferometrii, kterou byla potvrzena optická měřitelnost deformace v blízkém okolí hlavy šroubu definující reálnou sílu působící na šroub. Vyhodnocení bylo ve 2D v pohledu rovnoběžném s osou šroubu, což by v aplikaci s přírubovým spojem mohlo být problematické vzhledem k napojenému potrubí.

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je ověření kontrolovatelnosti rozměrů přírubového spoje pomocí optických metod vedoucí k možnosti analýzy jeho těsnosti při provozních podmínkách. Pro možnost vyhodnocení vhodnosti komerčně nabízených měřicích systému musí být navržen experiment simulující reálné provozní podmínky a zároveň umožňující simultánní snímání pro získání porovnatelných dat. Dalším cílem je ověřit shodu normovaného výpočtu s reálně naměřenými daty, což umožní získat zpětnou vazbu k definování správných podmínek montáže pro zajištění těsnosti spoje.

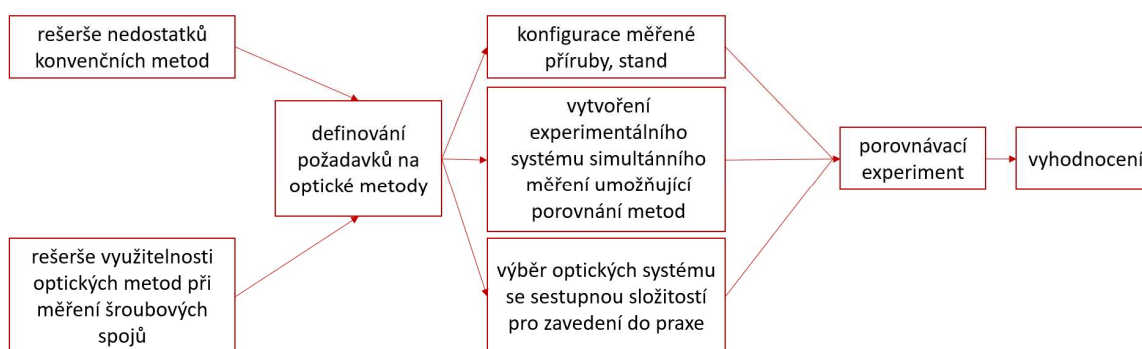
Dílčí cíle diplomové práce:

- definování různých optických systému se sestupnou složitostí a náročností na přípravu i samotné měření,
- navržení postupu experimentálního měření umožňující simultánní záznam ze všech testovaných optických systémů,
- porovnání jednotlivých systému a vyhodnocení jejich využitelnosti.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Postup řešení

Na základě rešerše byly definovány požadavky na výsledný systém měření plynoucí z nedostatků konvenčních metod a možností, které teoreticky dávají optické metody. Pro ověření teoretických předpokladů bude navržen experiment, který umožní porovnání jednotlivých metod a systémů. Blokové schéma (Obr. 4-1) znázorňuje hlavní úkoly pro splnění definovaných cílů práce.



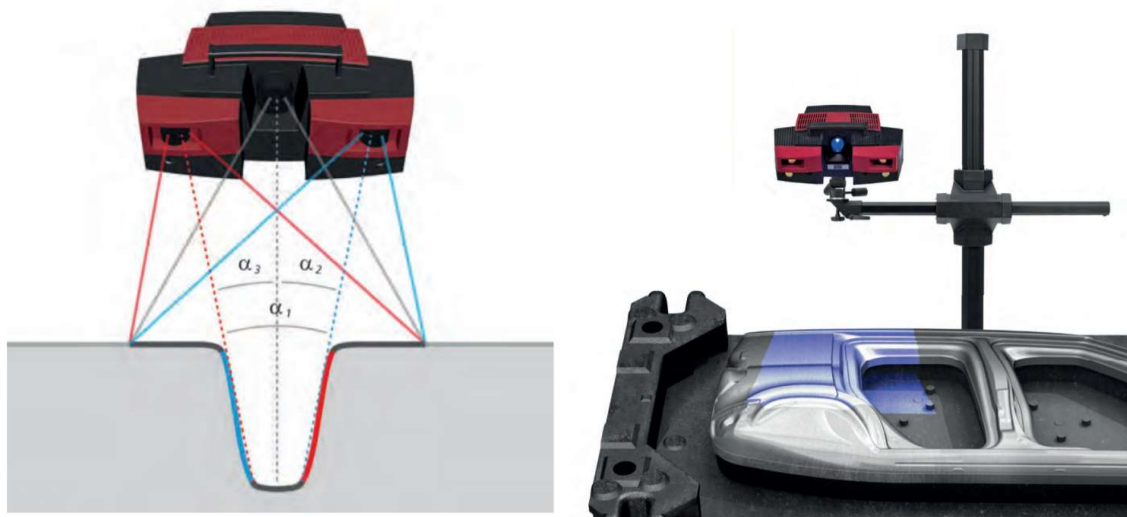
Obr. 4-1 Blokové schéma postupu práce.

4.2 Optické systémy

Využité optické systémy (Atos, Aramis a Tritop) jsou zapůjčeny společností MCAE Systems, s.r.o., která je licencovaným obchodním partnerem GOM (skupina ZEISS Industrial Quality Solutions). Pořizovací náklady jednotlivých zařízení jsou chráněny obchodním tajemstvím, nicméně se pohybují v řádech statisíců až miliónů korun českých.

4.2.1 Skener Atos Triple Scan

Skenování umožňuje měřit souřadnice rozložené po celé ploše zájmového objektu s tím, že v řádech sekund je možné získat data pro 16 milionů měřených bodů [30]. Atos pracuje na základě vícenásobné perspektivy (kombinace aktivování kamer a projektoru), kdy je na povrch součásti promítán přesný rastrový vzor. Při tom je oblast zaznamenána z několika různých úhlů pomocí stereo snímání, což znamená snímání párem kamer se známou vzájemnou polohou. Povrch je během snímání zmatněn a opatřen lepenými body. Díky využití modrého světla, které osvětluje snímanou oblast, je možné odfiltrovat rušivé vlivy nebo naměřit příliš lesklé nebo tmavé plochy.

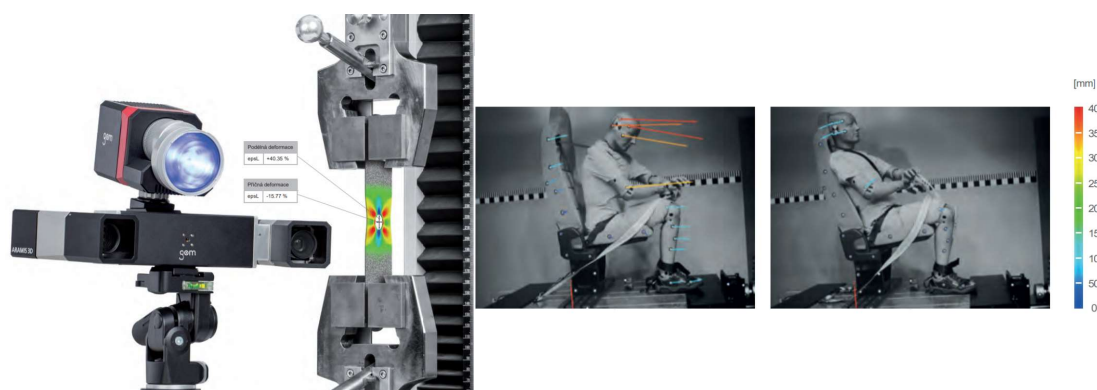


Obr. 4-2 Princip snímání povrchu (vlevo) a využití modrého světla (vpravo). [30]

Sestava příruby bude při každém kroku zatěžování snímána z 5 pozic, což umožní vyhodnocení kontrolních dat na výseku 180°, po celé ploše příruby i části vnitřních ploch listů.

4.2.2 Skener Aramis

Aramis je vhodný pro měření statických scén i rychlých dynamických dějů. Poskytuje 3D souřadnice 3D posunutí z čehož se určuje velikost deformace, rychlosti nebo zrychlení. Pracuje na principu digitální korelace obrazu, což znamená, že během snímání stereo párem kamer musí být měřený povrch součásti opatřen kontrastním skvrnitým vzorem nebo polepen referenčními body. Výsledky měření jsou vyhodnoceny se subpixelovou přesností, přičemž je možné využít funkci Live, kdy jsou záznamy hodnoceny v reálném čase. Aramis rovněž využívá modré světlo pro zvýšení kvality snímků.



Obr. 4-3 Vyhodnocení: plošné - statický děj (vlevo) a bodové - dynamický děj (vpravo). [31]

Příruba bude snímána z mírného nadhledu, což umožní vyhodnocení na výseku 90° na horní ploše příruby a obvodových plochách listů. Vnitřní plochy nemohou být v tomto měření zaznamenány.

4.2.3 Kamera ZWO ASI1600MM

Tato monochromatická kamera s rozlišením 4656×3520 pixelů bude využita k pořizování snímků na 2D snímání (jak radiální, tak siluety). Obsažený čip 4/3 inch 16,4 megapixel CMOS Image Sensor MN34230PL zvyšuje celkovou citlivost a ostrost obrazu. Výsledná velikost jednoho pixelu je $3,8 \mu\text{m}$ pro obraz o rozměrech $17,6 \times 13,3 \text{ mm}$.

Příruba bude focena z kolmého pohledu na rovinu tečnou k jejím listům, přičemž vyhodnocení bude možné pouze v pomyslné ose šroubu.

4.2.4 Fotoaparát (Tritop)

Digitální fotogrammetrický systém nebude využit pro samotné vyhodnocení deformací, ale jako podpora pro 2D měření a Aramis. Během pořizování snímků musí být v celé scéně rozmístěny referenční body i speciální kódované značky. Dále se musí umístit kódovaný kříž a dvě kalibrační tyče určující měřítko. Díky wi-fi modulu mohou být snímky vyhodnocovány v reálném čase, což poskytuje jistou časovou úsporu, která vznikne eliminací opakování snímání kvůli uživatelem nerozpoznané špatné kvalitě snímků.



Obr. 4-4 Kódované značky a kříž. [32]

4.3 Vyhodnocení dat

Na vyhodnocení dat byly licence programů (Inspect, Correlate a Aramis) také zapůjčeny společností MCAE Systems, s.r.o. Pořizovací náklady se pohybují ve stovkách tisíc korun českých. V případě softwaru GOM Inspect je možné získat trialovou verzi zdarma. Má omezení na upravování již zadaných příkazů, ale je možné v ní vytvořit nový projekt a vyhodnotit ho, jen je to uživatelsky nepřívětivé. Verze program Correlate, který lze získat zdarma, umožňuje pouze otevírání již existujících projektů, ale je v ní možné zadávat nové měření na součásti.

4.3.1 Matlab R2019b

Software bude využit ke kalibraci 2D kamery. Pomocí implementovaného toolboxu na kalibraci kamer bude získána matice parametrů kamery ZWO ASI1600MM. Touto kamerou bude nasnímána kalibrační šachovnicová deska v požadovaném počtu 10 až 20 snímků. Snímky budou zpracovány zabudovaným řešičem a následně pomocí maticového zápisu využity k odstranění radiálního a tangenciálního zkreslení vzniklého vnitřní geometrií kamery.

4.3.2 Tritop

Sesazení snímků: pomocí polohy kódovaných značek lepených referenčních bodů

Měřítko: kalibrační tyče

Soubor snímků z Tritopu bude vyhodnocen pro vytvoření přesného mračna bodů, na které se budou mapovat skeny z Aramisu. Tímto vyhodnocením se sekundárně vytvoří přesný systém s definovaným měřítkem díky použitým tyčím, což umožní změření vzdáleností mezi referenčními body na deskách tvořící měřítko pro 2D radiální měření.

4.3.3 GOM Inspect Professional

Sesazení snímků: pomocí polohy lepených referenčních bodů

Měřítko: kalibrační deska

Software pracuje na principu srovnání nominálních (často CAD dat) a aktuálních (skutečný díl) dat. Z tohoto srovnání se pak vyhodnocují rozměrové analýzy (2D i 3D) a s tím spojené geometrické tolerance dílů. Při vyhodnocování naměřených dat budou jako nominální data sloužit skeny s utažením šroubů na 25 Nm. S tímto počátečním stavem budou srovnány všechny další kroky provedené během experimentu jako data aktuální.

4.3.4 GOM Aramis

Sesazení snímků: pomocí namapování snímků s lepenými referenčními body na mračno bodů z Tritopu

Měřítka: kalibrační deska

Software vyhodnocuje posuvy ve 3D a to jak na skvrnitém vzoru, tak na referenčních lepených bodech. Bodové vyhodnocení je možné i vytvořením bodu z určité skupiny pixelů zachycující vzor.

4.3.5 GOM Aramis Siluety

Sesazení snímků: teoreticky statická poloha (SW kalibrace pomocí lepených referenčních bodů)

Měřítka: známá hodnota v obraze

Program na generování siluet z obrazu je v nyní ve fázi testování uživateli programu Aramis. Měřítka bude zaneseno výběrem pixelů určující průměr příruby a kontrolováno následným měřením rozteče šroubu jakožto druhé známe hodnoty z obrazu. Pro samotné měření bude využita kontura objektů definovaná gradientem v odstínech šedi. Touto selekcí hran vznikne jedna silueta v rovině osy přírubového spoje. Na ní budou měřeny 2D posuvy.

4.3.6 GOM Correlate

Sesazení snímků: teoreticky statická poloha (SW kalibrace pomocí lepených referenčních bodů)

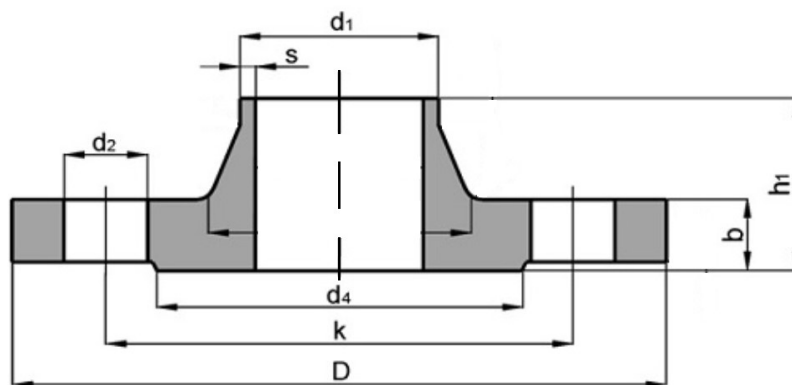
Měřítka: 2D radial: známá hodnota v obraze – vzdálenost bodů na referenčních deskách

Vyhodnocení 2D radiálního měření proběhne ve dvou rovinách, ve kterých jsou umístěny referenční desky s lepenými body, a zároveň bude využitý vytvořený vzor pro generování nových bodů pro srovnání.

4.4 Podmínky a průběh experimentu

4.4.1 Příruba

K měření byla vybrána běžně využívaná příruba s krkem EN1092-1 DN50/60,3 PN6 (rozměry jsou uvedeny na Obr. 4-5 a v Tab. 4-1) určená pro topení a čerpadla (materiál P245GH). Vzhledem k jejímu užití není v provozu spoj vystavený ani extrémně vysokým teplotám a ani tlaku, tudíž měření nebude vyžadovat utahování příruby na vysoké momenty (do 100 Nm) a nebo zahřívání na extrémně vysoké teploty (do 250 °C) s čímž by rostly náklady na uchycení příruby a zároveň na bezpečnostní prvky okruhu měření.



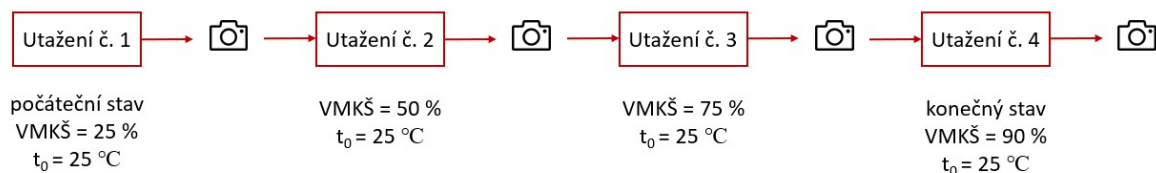
Obr. 4-5 Kóty hlavních rozměrů příruby.

Tab. 4-1 Hlavní rozměry příruby.

Kóta	Rozměr	Kóta	Rozměr
D	140 mm	k	110 mm
d ₁	60,3 mm	d ₂	4 x 14 mm
s	2,9 mm	h ₁	38 mm
d ₄	90 mm	b	14 mm

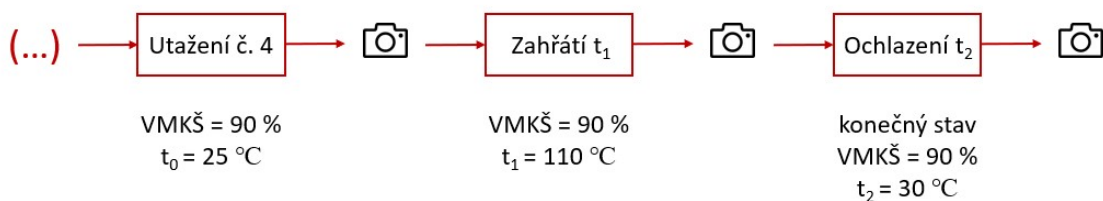
4.4.2 Postup měření

Utažení svorníků a vliv teplotních změn je klíčový parametr těsnosti spoje. V rámci experimentu bude měřena citlivost metod na dilatace spojené s těmito jevy. Jednotlivé kroky budou zaznamenány skenováním, stereo párem kamer na 3D měření a průmyslovou kamerou na 2D snímky.



Obr. 4-6 Postup měření při utahování

Počáteční stav utažení svorníků je definován 25 %ty meze kluzu šroubů. Během procesu utahování bude postupováno standardizovaným procesem, což znamená, že svorníky se utahují do kříže při počtu kroků 3 při přechodu z předchozího stavu na následující. Měření (Obr. 4-6) bude třikrát opakováno, kdy se po zaznamenání utažení č. 4 vymění těsnění a obnoví se mazivo na šroubech.



Obr. 4-7 Postup měření při teplotním testu.

Po třetím opakování celého experimentu bude utažení č. 4 považováno za počáteční stav při měření citlivosti na dilatace vlivem teploty. Sestava příruby bude zahřáta na teplotu 110 °C, což představuje teplotní šok pro danou třídu a následně bude zaznamenán stav i po ochlazení kvůli relaxaci materiálů (Obr. 4-7).

Utahování

Konkrétní utahovací momenty byly vypočítány v softwaru novaDISC 8. Následující dvě tabulky (Tab. 4-2 a Tab. 4-3) představují vstupní hodnoty výpočtu.

Tab. 4-2 Výběr těsnicího materiálu.

Parametr	Hodnota
Médium	voda
Filtr	ne
Teplota	od 20 °C do 120 °C
Pracovní přetlak	0 bar
Těsnění	novapress 850

Tab. 4-3 Vstupní parametry pro výpočet utahovacích momentů.

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
Těsnění podle:	Tab. 4-2	Rozměry těsnění:	ø60 - ø90 mm
Příruby podle:	PN	Tloušťka těsnění:	2 mm
Tvar těsnící plochy:	B – „těsnící lišta“		
Jmenovitý tlak:	PN 6	Využití meze kluzu:	25 %, 50 %, 75 %, 90 %
Jmenovitá světlost:	50		
Druh šroubů:	Hl. svorníky s M závity		
Počet x závit:	4 x M12		
Součinitel tření:	šroub 0,11, matka 0,11		

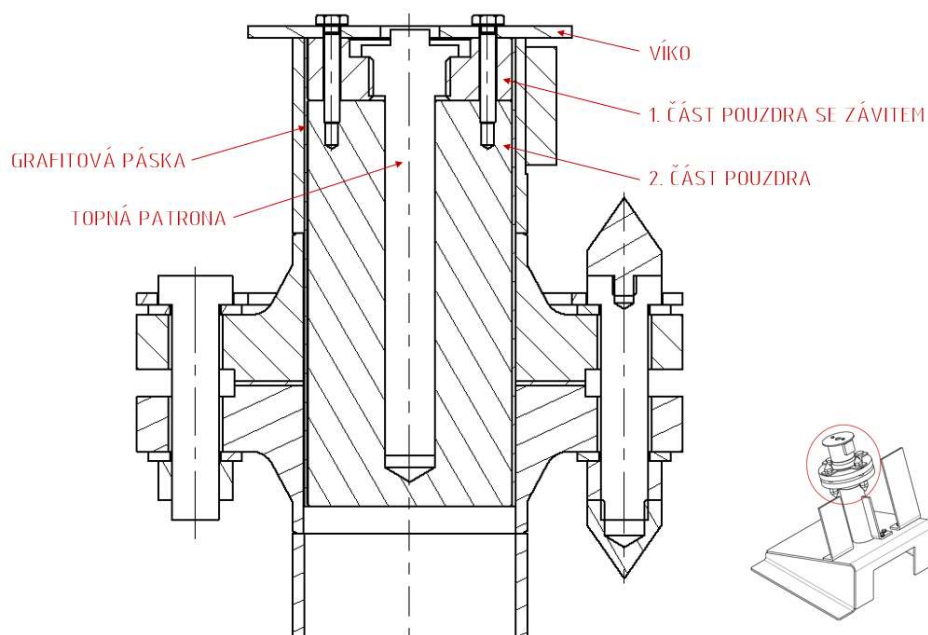
V následující tabulce (Tab. 4-4) jsou vypsány výsledné hodnoty odpovídající výpočtu v SW NovaDisc 8, s tím, že třetí a čtvrtý sloupec ukazuje mezikroky utahování mezi zaznamenávanými hodnotami.

Tab. 4-4 Vypočítané utahovací momenty.

Využití meze kluzu šroubů (VMKŠ)	Vypočítaný utahovací moment	Mezikrok utahování č. 1	Mezikrok utahování č. 2
25 %	22 Nm (použito 25 Nm)	31 Nm	37 Nm
50 %	44 Nm	51 Nm	58 Nm
75 %	66 Nm	70 Nm	75 Nm
90 %	80 Nm	-	-

Teplotní test

Příruba bude ohřívána zasunutým hliníkovým pouzdrům, ve kterém bude uložena topná patrona od společnosti easytherm.cz s.r.o. (označení: NW 12.7 D101 L230V 350W 300SL 450°C + TK3 + FTG1/2). Bude napájena 230 V přes regulátor kvůli zamezení jejímu přehřátí. Pouzdro (Obr. 4-8) se skládá ze dvou částí, aby do něj bylo možné vyřezat závit v délce rozšíření patrony, a tím navýšit kontaktní plochu. To zabrání lokálnímu přehřívání, což umožní kontinuální ohřev a tím pádem zkrácení doby ohřevu příruby. Přenos tepla mezi hliníkovým pouzdrům a přírubou (respektive trubkou) bude zvyšovat grafitová páska, která vyplní vzduchovou mezeru s nízkou tepelnou vodivostí.



Obr. 4-8 Schématické zobrazení uložení topné patrony.

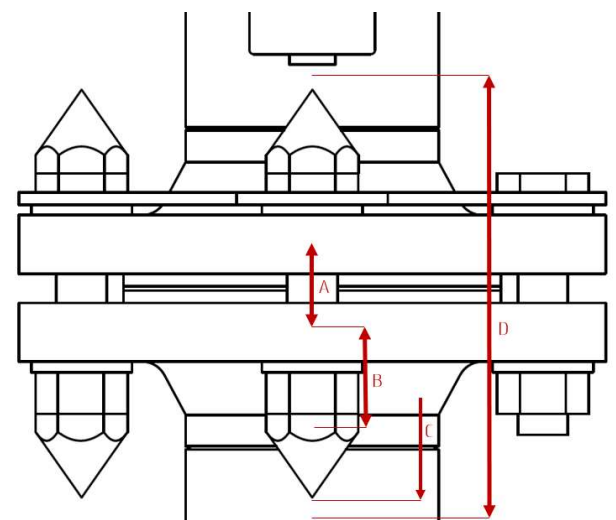
Pro kontrolu teploty na přírubě na ni bude přivařen termočlánek. Při dosažení požadovaných hodnot bude napájení patrony zastaveno. I přes to, že bude stand chlazen (Obr. 4-17), tak bude na pravé referenční desce (Obr. 4-16) přivařen druhý termočlánek pro kontrolu teploty.

4.4.3 Vyhodnocení

Veškeré měřené vzdálenosti vychází z již zmíněné normy ČSN EN 1591-1. Jsou to určující kontrolní rozměry pro výpočet utahovacích momentů a zároveň základní sada dat umožňující porovnání jednotlivých metod. Jejich popis je v následující tabulce (Tab. 4-5), kde je zaznamenáno i v jakém typu měření budou pozorovány. Obr. 4-9 zobrazuje jejich rozmístění.

Tab. 4-5 Základní měřené rozměry.

Rozměr	Popis	Sken	3D	2D radial	2D siluety
A	Přiblížení listů	ano	ano	ano	ano
B	Stlačení podložky	ano	ne	ne	ano
C	Protažení šroubu	ano	ano	ne	ano
D	Stlačení těsnění	ano	ano	ano	ano

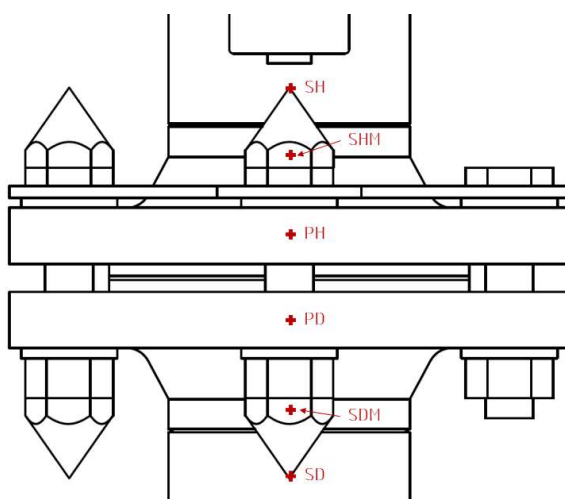


Obr. 4-9 Základní měřené rozměry.

V případě siluet budou posuvy vyhodnocovány na šroubu vlevo (Obr. 4-9), tudíž budou hodnoty označeny jako A', B', C' a D'.

Omezení vyhodnocení u 3D měření plyne ze zobrazované oblasti a současně z nemožnosti vyhodnocovat lesklou matici, na které by se během užití klíče zničily jakékoli reference. U 2D měření není možné vytvořit přesné měřítko v rovinách jiných kontrolních rozměrů (například rovina plochy šestihranu kužele).

Dále budou vyhodnocovány bodové posuvy znázorněné na Obr. 4-10 a popsány v Tab. 4-6. Pro vyhodnocení siluet opět platí, že budou vyhodnoceny na levém šroubu s označením SH' a SD'.



Obr. 4-10 Základní měřené body.

Tab. 4-6 Základní měřené body.

Rozměr	Popis	Sken	3D	2D radial	2D siluety
PH, PD	Rotace přírub	ne	ano	ano	ne
SH, SD	Posuv šroubu (osa)	ano	ne	ne	ano
SHM, SDM	Posuvy na šroubu	ne	ano	ne	ne

Vyhodnocení rotace na naskenovaném díle je možné, ale je nutné mít v sestavě dostatečně velké referenční ustavovací elementy s rovinnými plochami. V tomto konkrétním případě rotačního dílu by musela být do sestavy nějaká dostatečně tuhá reference přivařena, což by ovlivňovalo další vyhodnocení. V případě siluet jakožto 2D měření není možné vyhodnotit rotaci, protože se nijak nepromítne na generované kontuře. Omezení u 2D radial plyne z nemožnosti vytvoření měřítek v potřebných rovinách.

4.4.4 Úprava povrchu

Aby bylo možné výše uvedené rozměry a body vyhodnotit, tak musí být upraven povrch příruby a vyhotoveny šroubovací kolíky. Jednotlivý popis přípravy kontrolních prvků a jejich využití je popsán níže.

Lepené body

Na ploše příruby a standu budou nalepeny body, které jsou nezbytné pro skenování a vytvoření měřítek pro 2D měření. Budou použity kruhové značky o průměru 1,5 mm a 3 mm. Pomocí těchto nalepených bodů jsou na sebe sesazeny jednotlivé skeny a zároveň to jsou měřené body, ze kterých může být vyhodnocena deformace. Mezi jednotlivými body také budou vyhodnocovány změny vzdáleností.



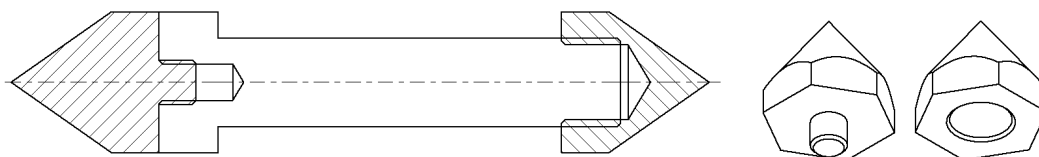
Obr. 4-11 Možnosti vzhledu lepených bodů.

Kontrastní vzor

Pro plošné vyhodnocení posuvů na povrchu součásti bude vytvořen stochastický vzor o základu z bílé barvy na vodní bázi a akrylové černé barvy, přičemž obě jsou odolné vůči otěru. Jednou z možností vyhodnocovacích programů je vytvoření bodu z určitého počtu pixelů zachycující vzor. Tato možnost nabízí porovnání vyhodnocení bodových a úsečkových posuvů pomocí lepených bodů a bodů vytvořených ze vzoru.

Kužely

Jednou z kontrolovaných deformací je prodloužení a vyosení šroubu. Vzhledem ke složitosti jeho geometrie je vytvořena teoretická přímka symbolizující osu spoje spojením vrcholových bodů soustružených kuželů. Do hlavy šroubu bude vyřezán závit, aby bylo možné kužel upevnit (Obr. 4-12).



Obr. 4-12 Schématické zobrazení měřících kuželů.

Polotovar pro výrobu kuželů bude šestihran, který vytvoří plochu pro nalepení kruhového bodu. Zároveň bude celá součást opatřena skvrnitým vzorem stejně jako příruba.

Výsledná příprava povrchu

Na obrázku (Obr. 4-13) je vidět výsledná konfigurace nalepení bodů a vzhled skvrnitého vzoru, jak na plochách příruby, tak kuželů.



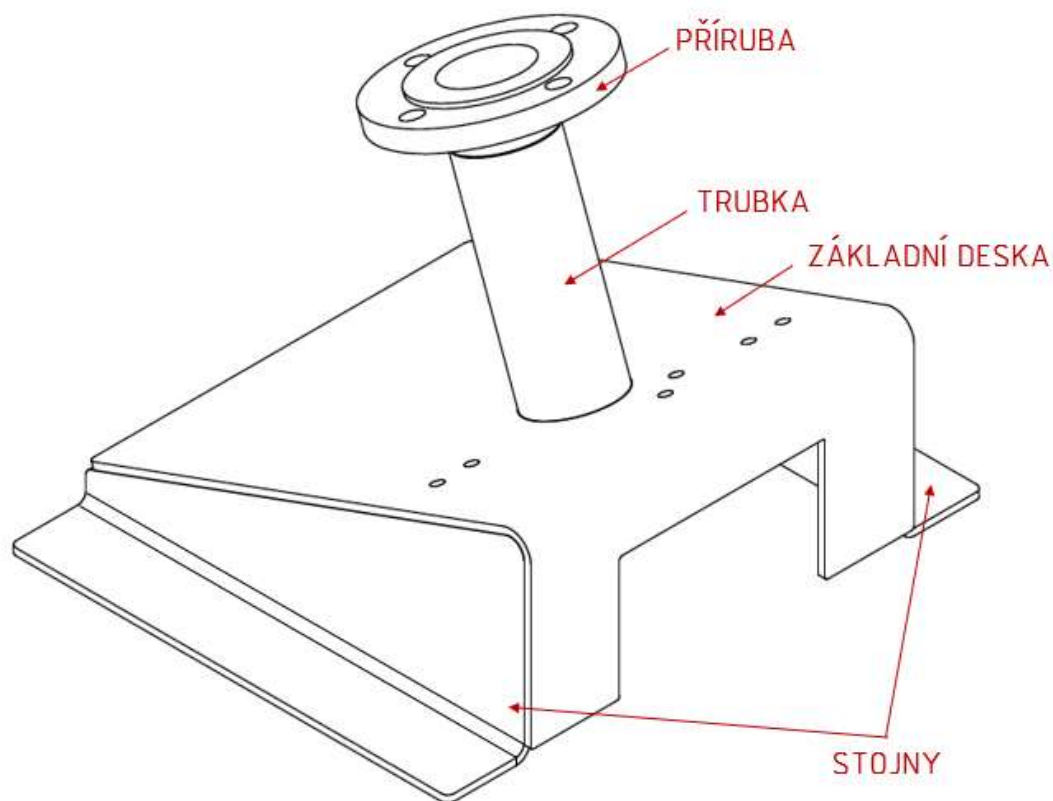
Obr. 4-13 Výsledná příprava povrchu.

4.4.5 Experimentální zařízení

Aby bylo možné zachovat neměnnou pozici kamery (2D měření) a scény, tak bude vyrobeno experimentální zařízení (dále také stand), který umožní sestavu připnout k pevnému měřicímu stolu. Měl by zároveň simulovat reálné uchycení příruby v provozu a umožnit vytvoření měřítek pro 2D měření v potřebných rovinách.

Svařenec spodní příruby

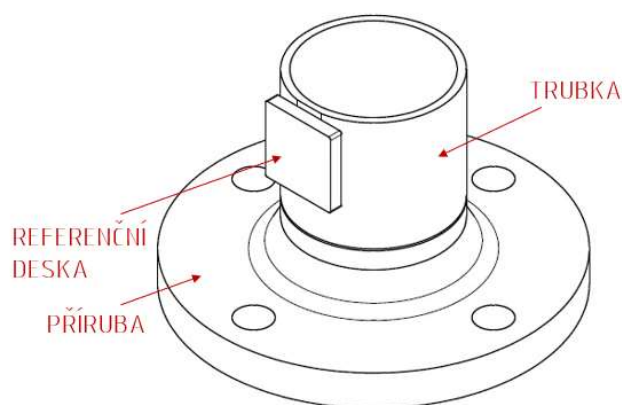
Základ standu (Obr. 4-14) tvoří svařenec z pálených a ohýbaných dílů (tloušťka plechu 5 mm), které vytvoří stojny umožňující upnutí ke stolu. V základní desce jsou vypáleny otvory pro vymezení pozice referenčních desek. Aby bylo možné jednodušeji zaznamenávat zájmovou oblast na obou přírubách od krku po vnitřní plochu na listu, tak je celá sestava nakloněna pod úhlem 20° . K desce je na pozici podle vygravírovaného kruhu přivařena trubka a k ní příruba.



Obr. 4-14 Schématické zobrazení základu standu.

Svařenec horní příruby

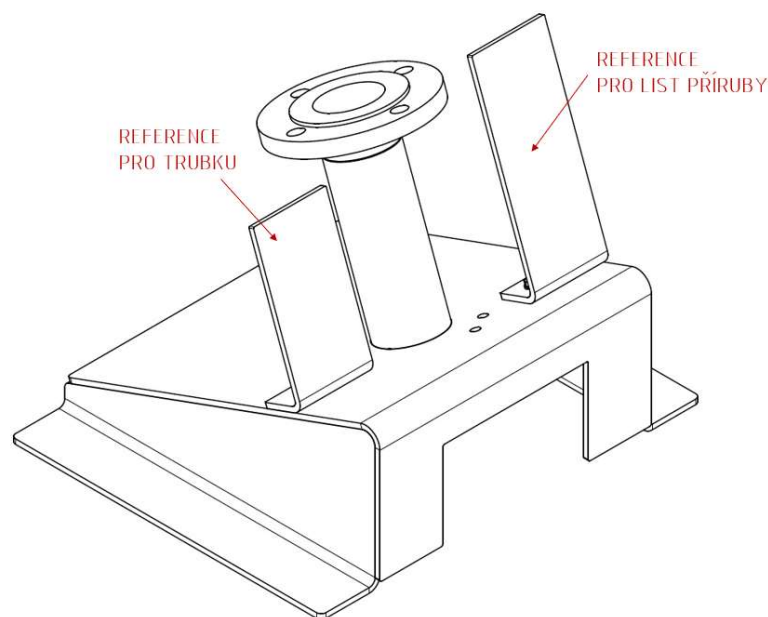
Druhá příruba (Obr. 4-15) je rovněž přivařena k trubce, do které bude při teplotním testu zasunuta topná patrona v pouzdře (Obr. 4-8). Na trubku je přivařena i referenční deska, aby bylo možné vytvořit souřadnicový systém u skenu. Pro jeho vytvoření je nutné označit rovinu (základní rovina xy), válcovou plochu, přičemž se pomocí její osy vytvoří průsečík se základní rovinou (tím bod 0 i směr třetí souřadnice, z) a poslední kolmá rovina, která definuje orientaci os v základní rovině (tedy osy x a osy y). Jako první rovina je použita plocha příruby a válcová plocha je plocha trubky, absence druhé roviny kolmé na první je vyřešena referenční deskou.



Obr. 4-15 Schématické zobrazení druhé půlky přírubového spoje.

Referenční desky

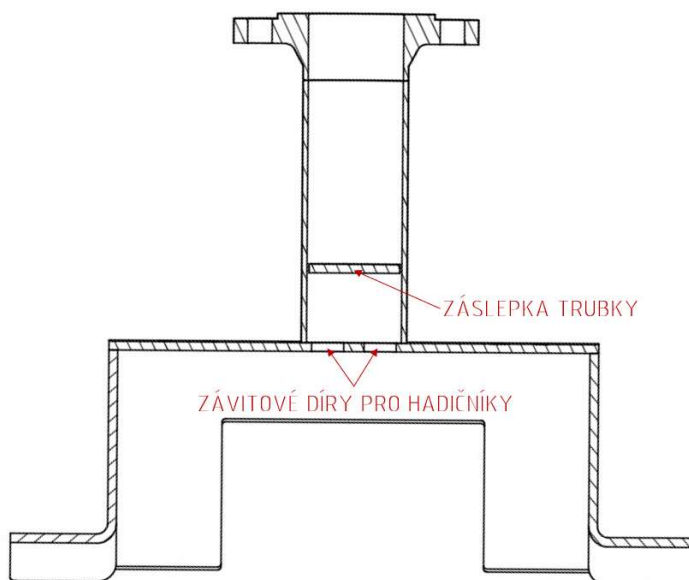
Vzhledem k tomu, že u 2D snímků se měřítko zanáší označením dvou bodů s definovanou vzdáleností, tak budou na základní desku přišroubovány referenční desky (Obr. 4-16) v rovinách vyhodnocení snímku. První rovina je tečná roviny k listu příruby a druhá je tečná k trubce. Referenční desky jsou také vyrobeny z páleného ohýbaného plechu a následně ustaveny na svařenci spodní příruby a připevněny šrouby M6.



Obr. 4-16 Schématické zobrazení referenčních desek.

Chlazení

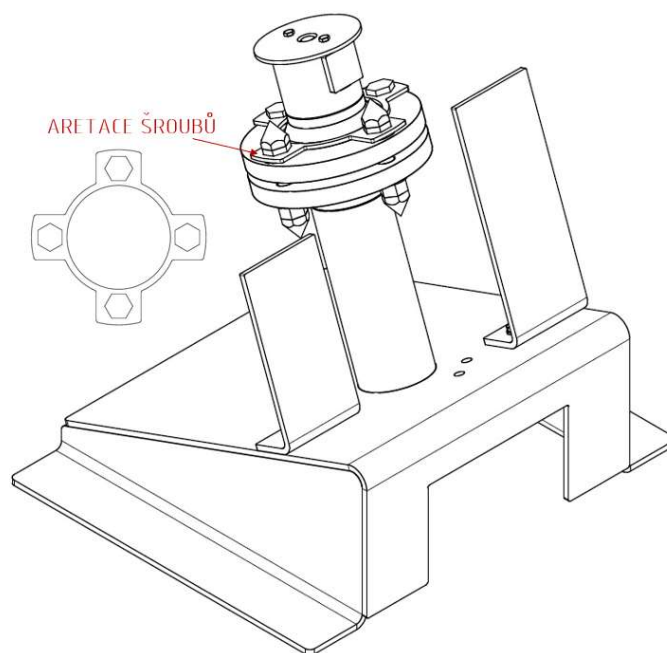
Vzhledem k tomu, že se bude během teplotního testu příruba zahřívat na 110 °C, navíc musí být stand chlazen, aby bylo zamezeno zkreslujícím posuvům díky teplotním deformacím základních desek. Do trubky (Obr. 4-17) bude vodotěsně přivařena záslepka a do desky, tvořící druhé dno trubky, budou vyvrtány dvě závitové díry (G 1/2"), do kterých se našroubují mosazné hadičníky. Na ně budou objímkami připevněny běžné zahradní hadice, jedna pro přívod vody a druhá pro její odvod.



Obr. 4-17 Schématické zobrazení prvků chladicího systému.

Celková sestava a aretace šroubů

Aby bylo možné vyhodnocovat posuvy na šroubech a dílech, které jsou s nimi rotačně spojeny, tak musí být zajištěna jejich statická poloha během celého měření. Z tohoto důvodu bude vyroben výpalek (Obr. 4-18) z 3 mm tlustého plechu, který bude nasazen na hlavy šroubu s obvodovou vůlí 0,5 mm. Při postupném utahování šroubů se tato vůle vymezí a šrouby se nadále nebudou protáčet.



Obr. 4-18 Schématické zobrazení celkové sestavy a aretace šroubů.

4.4.6 Porovnávací výpočet

Společnost MICO, spol. s r.o., zabývající se mimo jiné revizemi jaderných elektráren nebo projektováním čistíren odpadních vod, provedla a poskytla pro výzkumné účely této práce výpočet podle normy ČSN EN 1591-1, který poskytuje komplexní analýzu přírubového spoje. Z výpočtu budou do vyhodnocení převzaty hodnoty stlačení těsnění a rotace příruby, které budou porovnané s naměřenými daty. Vzorová výpočtová zpráva je přiložena v příloze.

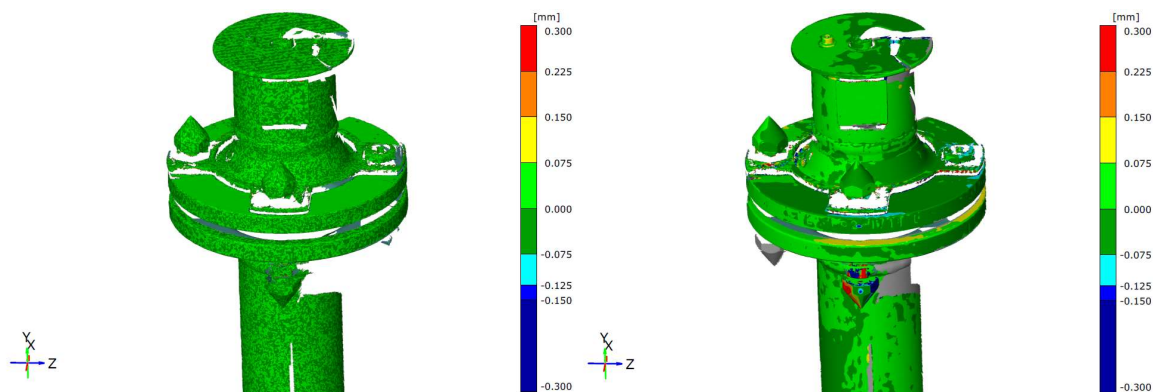
5 VÝSLEDKY

V následující kapitole jsou postupně uvedeny vyhodnocení jednotlivých metod (Sken, 3D, 2D Radial a 2D Siluety). Pro názornost jsou uvedeny pouze dílčí reprezentativní grafická vyhodnocení. Ty jsou odděleny popisem měření (M1, M2 a M3) a číselným popisem kroku utahování odpovídající velikosti aplikovaného momentu (utahovací momenty 25 Nm, 44 Nm, 66 Nm a 80 Nm). Vyhodnocují se rozdíly jednotlivých kroků vůči počátečnímu stavu při sestavení a utažení momentem 25 Nm. Všechny uváděné hodnoty jsou v mm. Pro přehlednost jsou veškerá vyhodnocení seřazena a kompletně vložena do příloh.

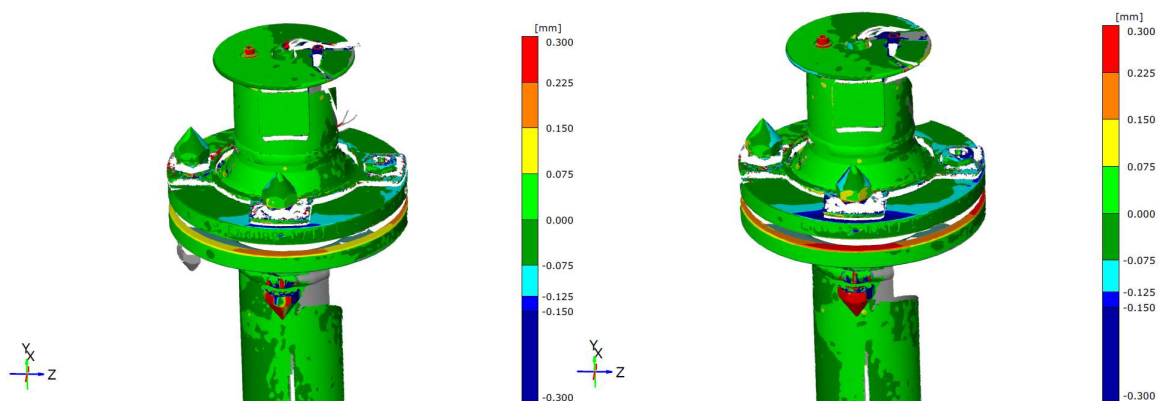
5.1 Sken (GOM Inspect)

5.1.1 Barevná mapa

Základním parametrem ovlivňujícím zobrazovanou výslednou mapu jsou vytvořené základny, které jednotlivé snímky ustavují a ke kterým se počítají výsledné posuvy v jednotlivých osách. Protože hlavní pozorované průběhy deformací jsou na listech přírub (Obr. 5-1 a Obr. 5-2), tak bylo pro zobrazení map vybráno ustavení Best fit (metoda nejmenších čtverců), při kterém bude graficky odstraněn dominantní posuv vlivem stlačení těsnění a vynikne průběh deformace na listech. Toto odstranění je pouze v rozkreslení mapy, nikoli v hodnotách samotných, ty jsou ve všech typech možných nastavení stejné.



Obr. 5-1 Průběh deformace na listech příruby M1_25 (vlevo) a M1_44 (vpravo). (Sken)

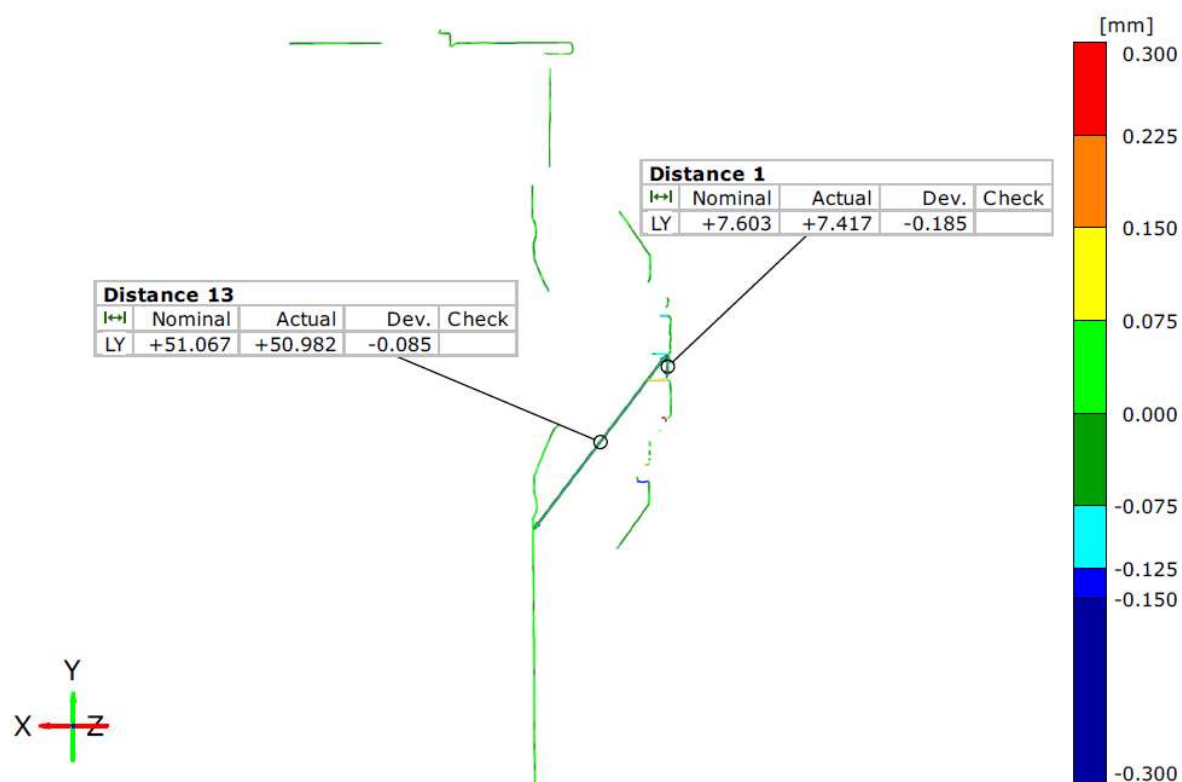


Obr. 5-2 Průběh deformace na listech příruby M1_66 (vlevo) a M1_80 (vpravo). (Sken)

Z těchto výsledků se dají odečíst hodnoty vedoucí k vyhodnocení průběhu kontaktního tlaku. Deformace odečtené po obvodu příruby jsou zobrazeny v polárních grafech v následující kapitole.

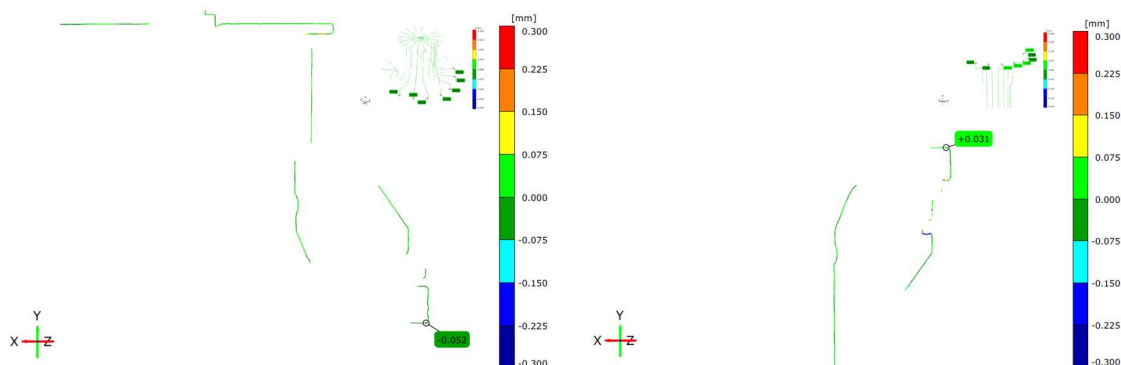
5.1.2 Polární grafy

Na polovině naskenované příruby bylo vytvořeno 8 řezů, přičemž mezi jednotlivými řeznými rovinami byl úhel $22,5^\circ$. Z tohoto řezu byla odečtena hodnota přiblížení listů přírub (dY) a hodnota poklesu spodní části příruby (dY) (Obr. 5-3).



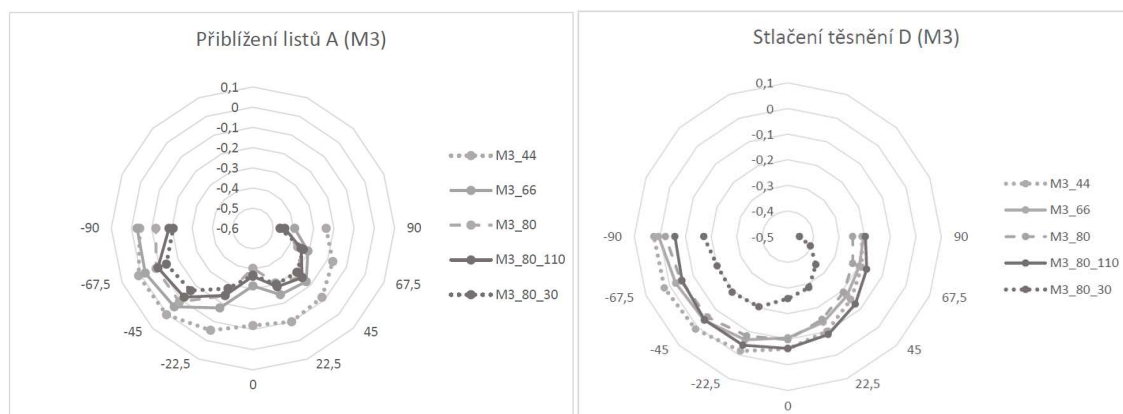
Obr. 5-3 Měření v řezu M1_44 k zjištění hodnot přiblížení přírub. (Sken)

Následně byly stejným způsobem vyhodnoceny příruby odděleně (Obr. 5-4), aby byla získána hodnota ohybu listu bez vlivu stlačení těsnění a posuvu v ustavení. To znamená, že byly vyhodnoceny jako samostatné díly, na kterých byla hodnocena pouze změna tvaru listu.



Obr. 5-4 Vyhodnocení posuvů zvlášť na obou přírubách při M1_44. (Sken)

Z těchto hodnot byla výpočtem určena velikost stlačení těsnění. Od celkového přiblížení přírub se odečetla hodnota ohybu listů a posuv vzniklých na spodní přírubě. Výsledné hodnoty byly zaneseny do polárního grafu zobrazující průběh deformací (Obr. 5-5). Polovina příruby byla skenována jako dostatečné množství dat pro vyhodnocení možností metody.

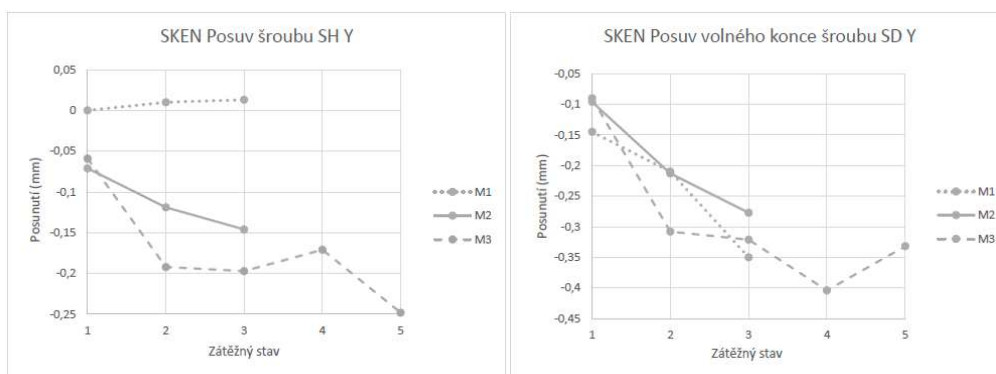


Obr. 5-5 Polární graf zobrazující přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo), pro M1. (Sken)

U měření M1 nebyla v dostatečné kvalitě naskenovaná celá polovina příruby a proto nejsou krajní body vyhodnoceny. Všechny průběhy naznačují, že šroub (na pozici -90) byl méně utažený oproti ostatním. Hlavním důvodem tohoto jevu je fakt, že tento šroub byl při všech měření utahován jako první. Z vyhodnocení je také zřejmé, že průběh deformací na listech příruby neodpovídá rozložení stlačení těsnění, což je určující pro těsnost spoje. Je tedy nezbytné hodnoty nezaměňovat.

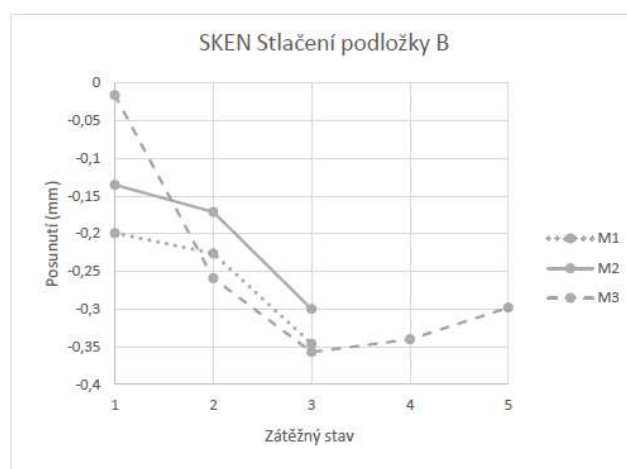
5.1.3 Posuvy

Vyhodnocení posuvu na šroubu bylo stanoveno pomocí hodnot (dY) na našroubovaných kuželech na hlavě i volném konci (Obr. 5-6). Vzhledem k tomu, že boční plochy kužele jsou velmi malé v porovnání s celou sestavou, tak nemohly být pomocí nich skeny ustaveny a vyhodnoceny v dZ a dX .



Obr. 5-6 Graf zobrazující průběh posuvů na šroubu. (Sken)

Posledním vyhodnocovaným rozměrem je velikost stlačení podložky, respektive přiblížení matice ke spodní přírubě (Obr. 5-7). Z grafu je patrné, že po ochlazení a relaxaci materiálu vzniknul rozdíl ve vzdálenosti, který může ovlivňovat velikost síly přenášenou do spoje a tím těsnost přírubového spoje.



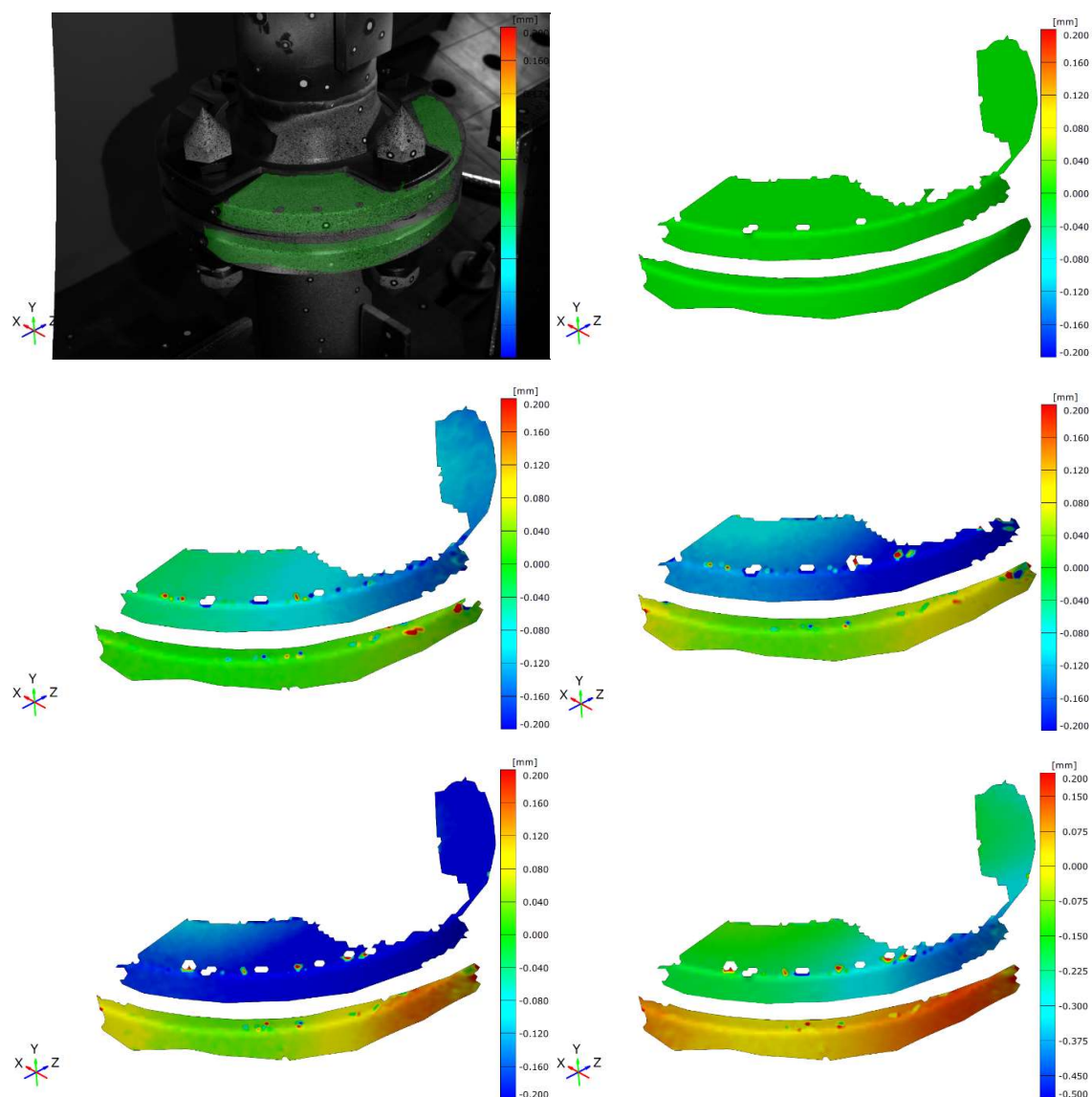
Obr. 5-7 Graf zobrazující průběh stlačení podložky. (Sken)

Ze všech uvedených grafů je čitelný jasný trend posuvů v závislosti na rostoucím zatěžení utahovacím momentem nebo teplotou. Metoda je dostatečně přesná i citlivá na velikost vznikajících deformací. Její omezení je ve velikosti a váze skenovací hlavy a v prostoru, který vyžaduje na pořízení dostatečného počtu snímků. Dalším omezujícím parametrem může být nutnost přidavných elementů, které by umožňovaly měření rotací rotačních částí. Jednalo by se o dostatečně velké a tuhé tvarové prvky tvořící roviny, ke kterým by se vztahovalo vyhodnocení posuvů ve směrech v této práci definované jako, X a Z.

5.2 3D (GOM Aramis)

5.2.1 Mapa posuvů

V případě ustavení snímků ze skeneru Aramis bylo využito mračno bodů získané Tritopem. Díky tomuto zarovnání není možné odstranit posuv celého horního svarku vlivem stlačení těsnění. Z tohoto důvodu je nutné měnit rozsah na barevné škále, aby byl vidět měnící se průběh deformace na horní přírubě (Obr. 5-8).

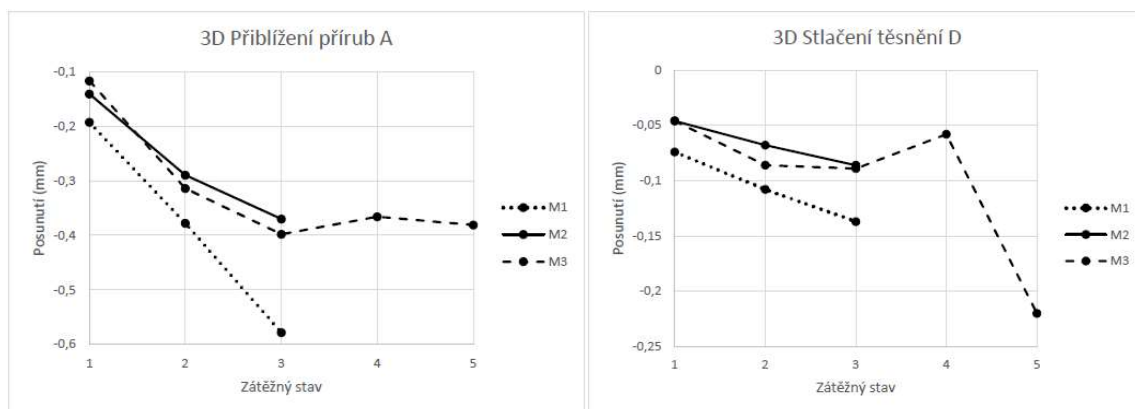


Obr. 5-8 Barevná mapa posuvů pro M1_25 (nahore), M1_44 (vlevo uprostřed), M2_66 (vpravo uprostřed) a M1_80 s rozdílnou barevnou škálou (dole). (3D)

Na rozdíl od vyhodnocování skenů (Inspect) jsou naměřené posuvy pouze na určité, kamerami viditelné, části příruby. Vzhledem k tomu, že je obraz složen ze dvou snímků pořizovaných pouze jednou v každém kroku beze změny pozice, tudíž není možné lépe nasnímat vnitřní plochy příruby, popřípadě její větší výřez pro možné vyhodnocení.

5.2.2 Posuvy

Přiblížení listů příruby a stlačení těsnění bylo detailně vyhodnoceno v rovině osy předního šroubu. Jeho průběh je znázorněn na Obr. 5-9.



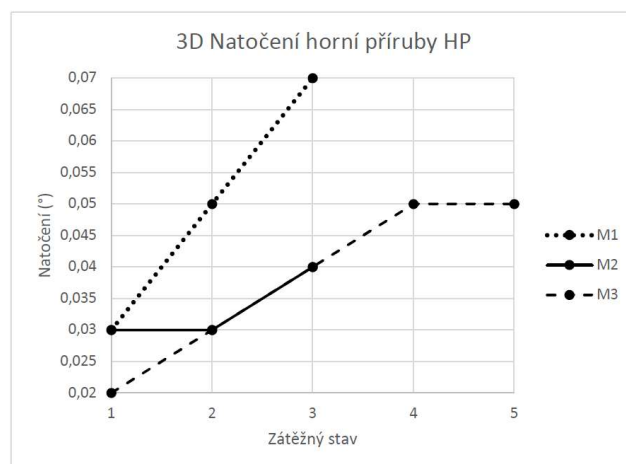
Obr. 5-9 Grafy zobrazující průběh přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo). (3D)

5.2.3 Rotace příruby

Průběh rotace horní příruby (HP) při postupném zatěžování je zobrazen na obrázku Obr. 5-10. Vzhledem k hodnotám vyčíslených na spodní přírubě (SP) (Tab. 5-1) nebyl průběh graficky znázorňován.

Tab. 5-1 Tabulka průběhu natočení horní (HP) a spodní (SP) příruby. (3D) (mm)

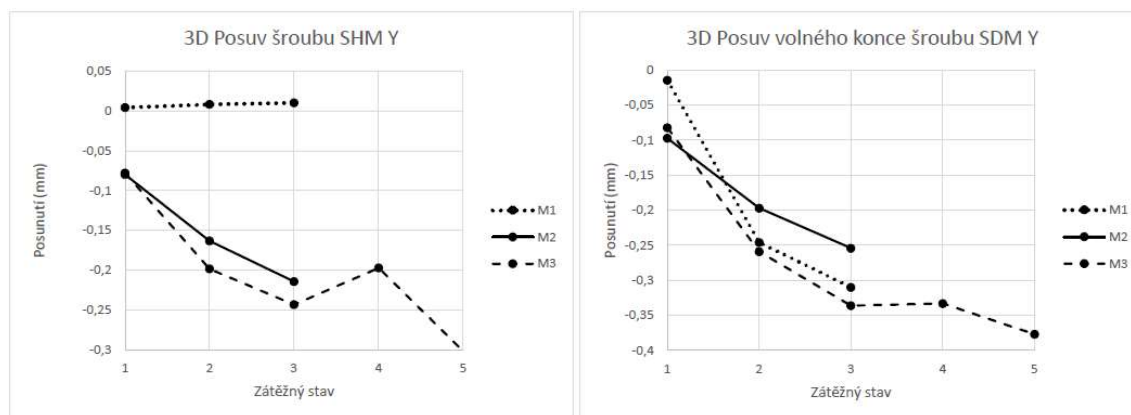
	M1_44	M1_66	M1_80	M2_44	M2_66	M2_80	M3_44	M3_66	M3_80	M3_80 110	M3_80 30
HP	0,03	0,05	0,07	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
SP	0	0	0,01	0	-0,01	-0,01	0	0	0	0	0



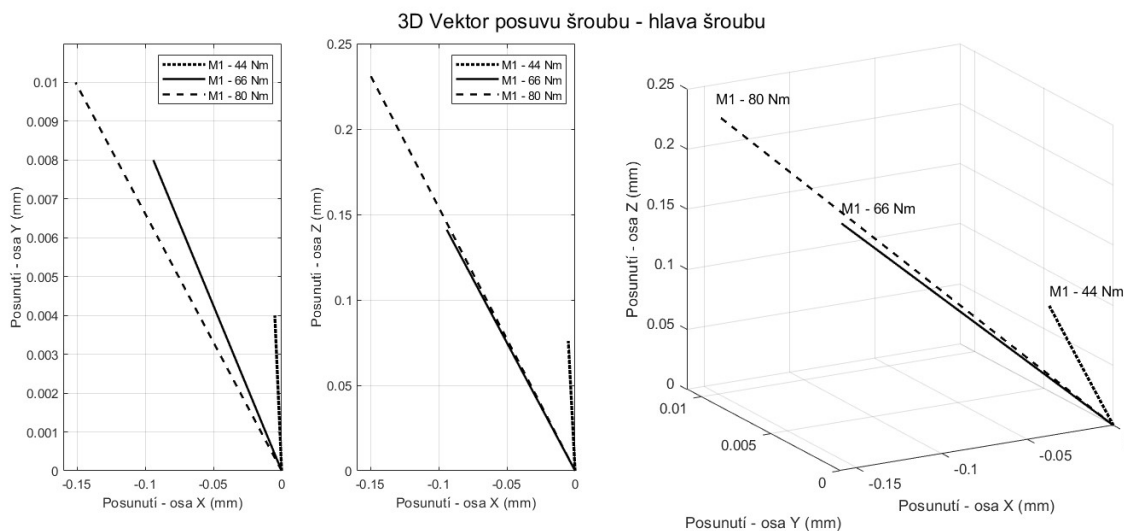
Obr. 5-10 Graf zobrazující průběh natočení horní příruby HP. (3D)

5.2.4 Vektory posuvů na šroubu

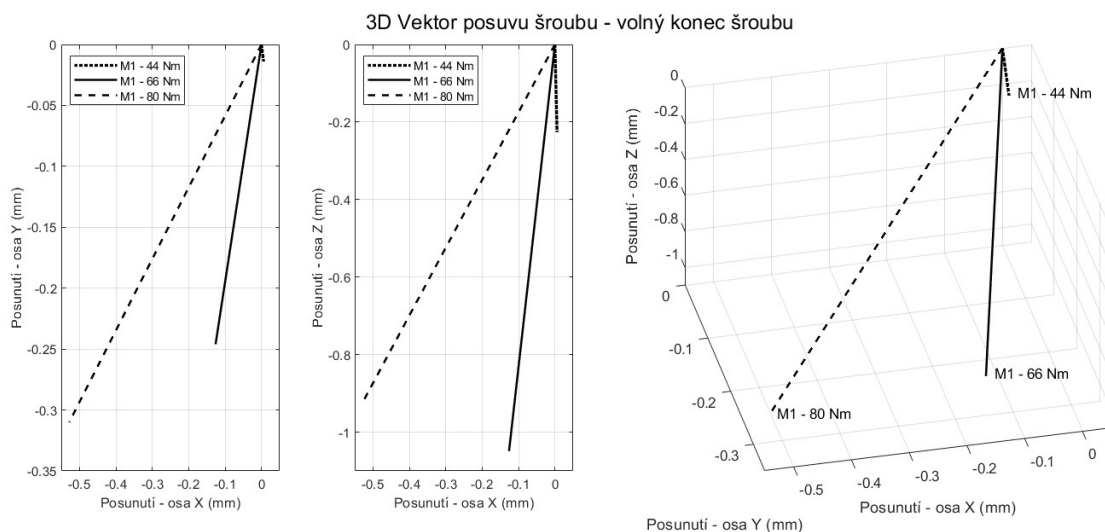
3D úloha umožňuje vyhodnotit posuvy na hlavě i volném konci šroubu ve všech souřadnicích a tím určit reálné rozložení síly. Vyosení šroubu značí, že nedochází k dostatečnému přenosu síly do přírubového spoje, což ovlivňuje těsnost. Je to tedy nezanedbatelný parametr ke komplexní analýze přenášené síly. (V externích přílohách práce je skript generující 3D grafy s možností jejich otáčení)



Obr. 5-11 Grafy zobrazující posuvy (dY) na hlavě šroubu (vlevo) a jeho volném konci (vpravo). (3D)



Obr. 5-12 Graf zobrazující posuvy naměřené na hlavě šroubu (M1). (3D)

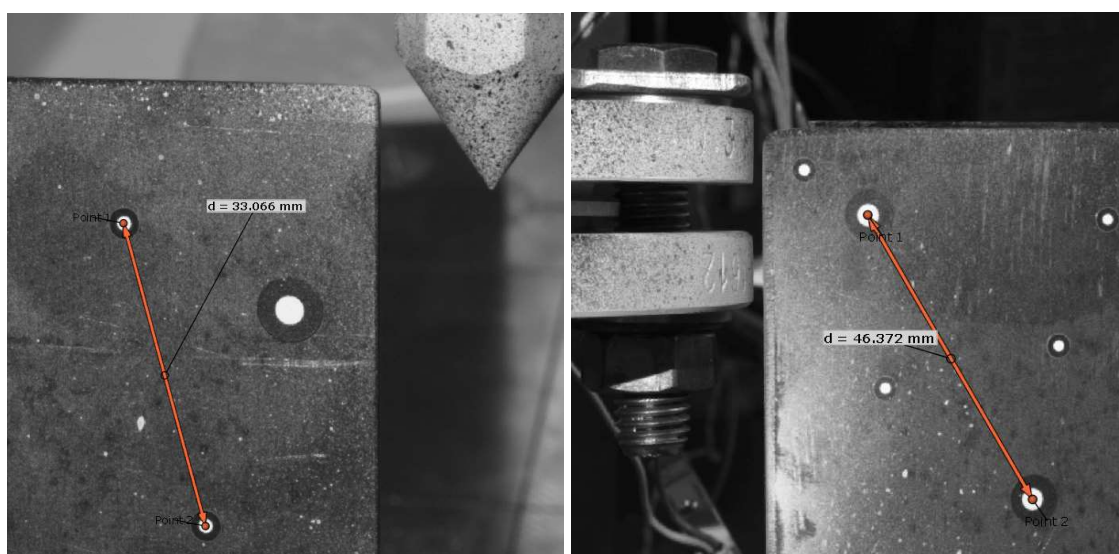


Obr. 5-13 Graf zobrazující posuvy na volném konci šroubu (M1). (3D)

Ze všech uvedených grafů je čitelný jasný trend v důsledku zatěžování rostoucím utahovacím momentem nebo teplotou. Metoda je dostatečně přesná i citlivá na velikost vznikajících deformací. Touto metodou se dají vyhodnotit stejné parametry jako u skenování, pouze na menším měřeném úseku. Výhodou této metody je, že díky kontrolním bodům je možné vyhodnocování rotací bez přídavných elementů k ustavení, čímž se získává komplexní analýza šroubového spoje.

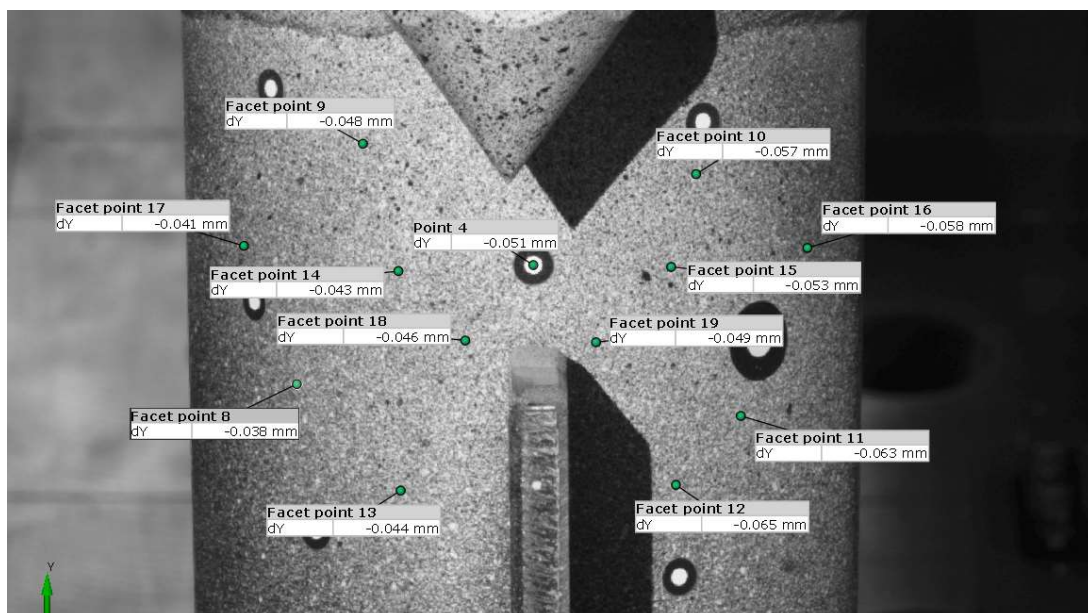
5.3 2D Radial (Correlate)

Vytvořená měřítka v Tritopu jsou zobrazena při zanesení do obrazu na Obr. 5-14. Měřítka se vytváří s přesností na vybraný pixel.



Obr. 5-14 Měřítka pro rovinu trubky (vlevo) a rovinu listu příruby (vpravo). (2D Radial)

Významným faktorem při vyhodnocování posuvů ve 2D měření byla zjevná citlivost na odchylky v případě větší křivosti na trubce. Vzhledem k tomu, že na přírubě není průběh deformace po obvodu konstantní, tak byly analyzovány data pouze ze spodní trubky, kde byl v ose nalepený kontrolní bod (Point 4), který má znázorňovat reálnou hodnotu. Posuvy (dY) byly odečteny z bodů na obou polovinách obrazu v přibližně stejné vzdálenosti od kontrolního bodu (Obr. 5-15). Jejich hodnoty jsou zapsány v tabulce Tab. 5-2.



Obr. 5-15 Rozmístění kontrolních bodů pro analýzu odchylek na nerovných plochách. (2D Radial)

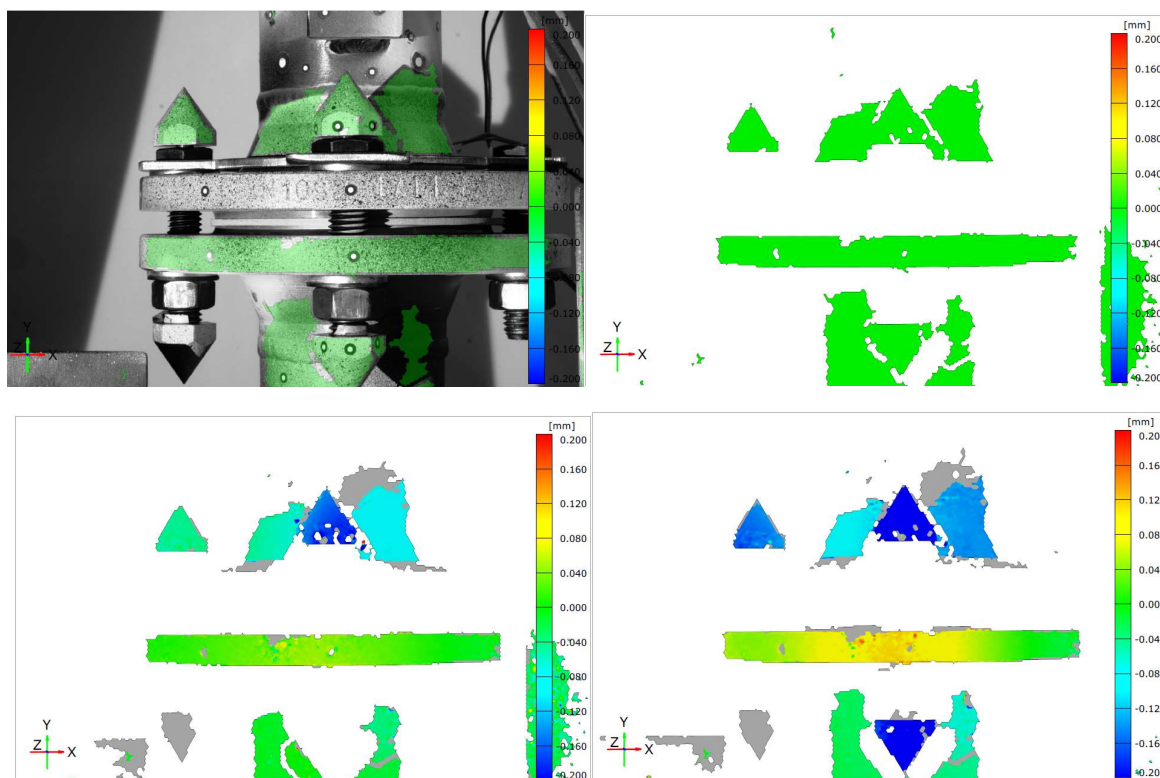
Tab. 5-2 Tabulka hodnot pro analýzu odchylek na nerovných plochách. (2D Radial) (mm)

Levá strana			Pravá strana			Průměrná hodnota dvojice		
M1_44	M1_66	M1_80	M1_44	M1_66	M1_80	M1_44	M1_66	M1_80
0,001	-0,031	-0,048	-0,013	-0,037	-0,057	-0,006	-0,034	-0,053
-0,004	-0,023	-0,041	-0,013	-0,039	-0,053	-0,009	-0,031	-0,047
-0,006	-0,024	-0,043	-0,012	-0,039	-0,058	-0,009	-0,032	-0,051
-0,010	-0,029	-0,046	-0,011	-0,037	-0,049	-0,011	-0,033	-0,048
-0,004	-0,021	-0,038	-0,021	-0,049	-0,063	-0,013	-0,035	-0,051
-0,100	-0,023	-0,044	-0,023	-0,051	-0,065	-0,06	-0,037	-0,055
Průměr hodnot dvojic:						-0,018	-0,034	-0,050
Průměrná odchylka:						0,0145	0,0018	0,0021
Odečtená hodnota z bodu (Point 4):						-0,014	-0,034	-0,051

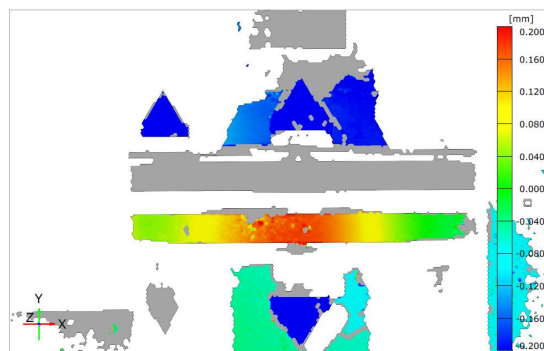
Z tabulky je patrné, že stabilita hodnot konkrétních dvojic bodů se mění mezi jednotlivými kroky utahování. Pravděpodobně je tato odchylka způsobena změnou kontrastu a stínů během osvětlování jednotlivých kroků, které bylo vždy znovu nastavováno. Vzhledem k tomu, že největší rozdíl mezi průměrnou hodnotou dvojic a naměřenou hodnotou je 0,004 s průměrnou odchylkou 0,0145, tak musí každý teoretický uživatel zvážit požadovanou přesnost na měření a velikost skupiny dvojic, aby nedocházelo k nepřesnému měření, pokud by vyhodnocení vyžadovalo tento postup.

5.3.1 Barevná mapa

I přesto, že stabilita hodnot na zaoblených plochách není příliš spolehlivá, tak je možné vytvořit vypovídající barevnou mapu posuvů, která ale bude posuzována pouze z hlediska relativních změn. Z důvodu příliš velkých odlesků na spodním horním listu příruby a trubce nemohla být mapa vykreslena celkově. I tak je z průběhu posuvů na spodním listu jasný trend způsobený jednotlivými kroky při utahování.

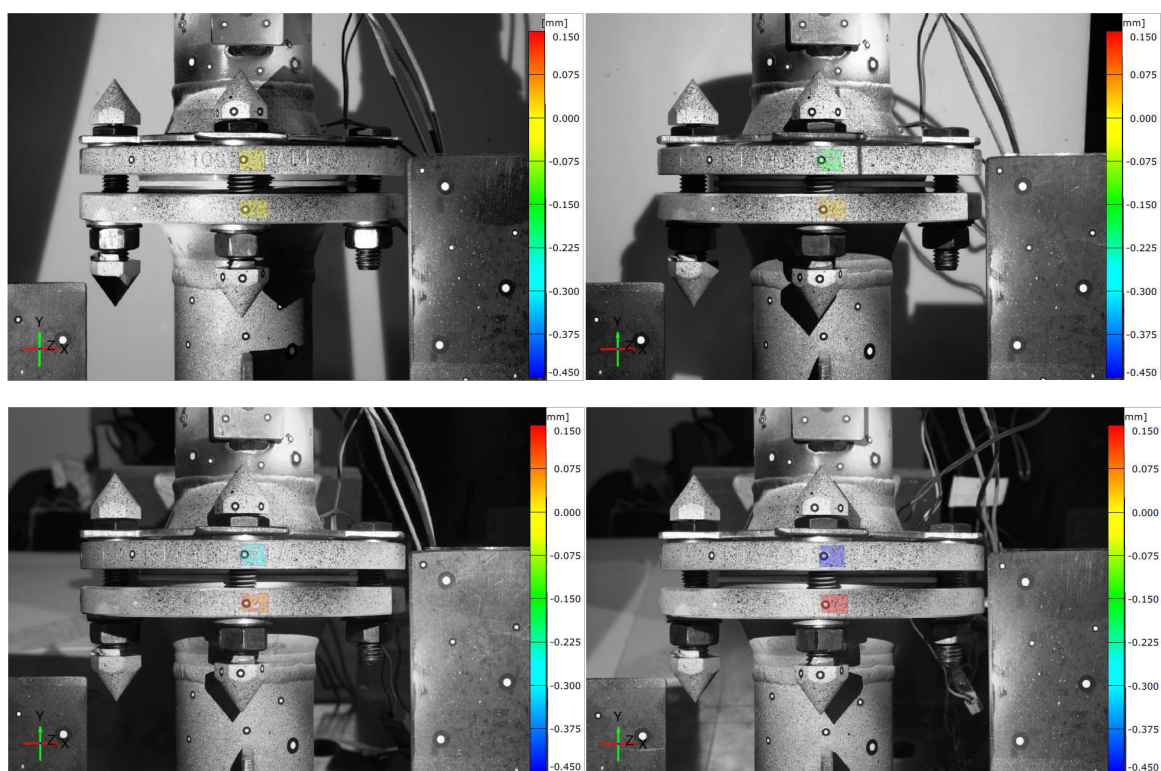


Obr. 5-16 Barevná mapa posuvů (dY) pro M1_25 (nahore), M1_44 (vlevo dole) a M1_66 (vpravo dole). (2D)



Obr. 5-17 Barevná mapa posuvů (dY) pro M1_80. (2D Radial)

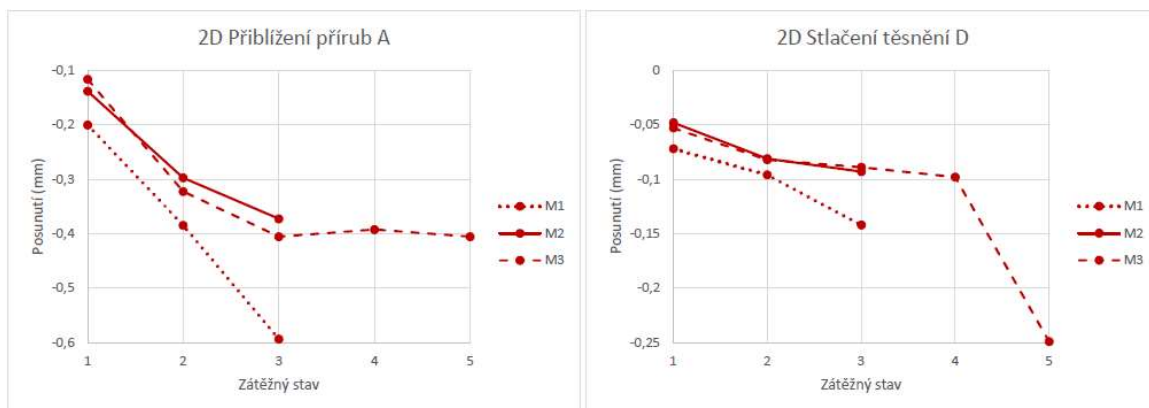
V případě vyhodnocení absolutních hodnot je nutné vybrat pouze nejbližší okolí teoretické osy vyhodnocení (Obr. 5-18). Toto měření ukáže přesná lokální data posuvu, ale svým rozsahem je v podstatě ekvivalentem bodovému vyhodnocení.



Obr. 5-18 Barevná mapa posuvů (dY) s absolutními hodnotami pro M1_25 (nahore vlevo), M1_44 (nahore vpravo), M1_66 (dole vlevo) a M1_80 (dole vpravo). (2D Radial)

5.3.2 Posuvy

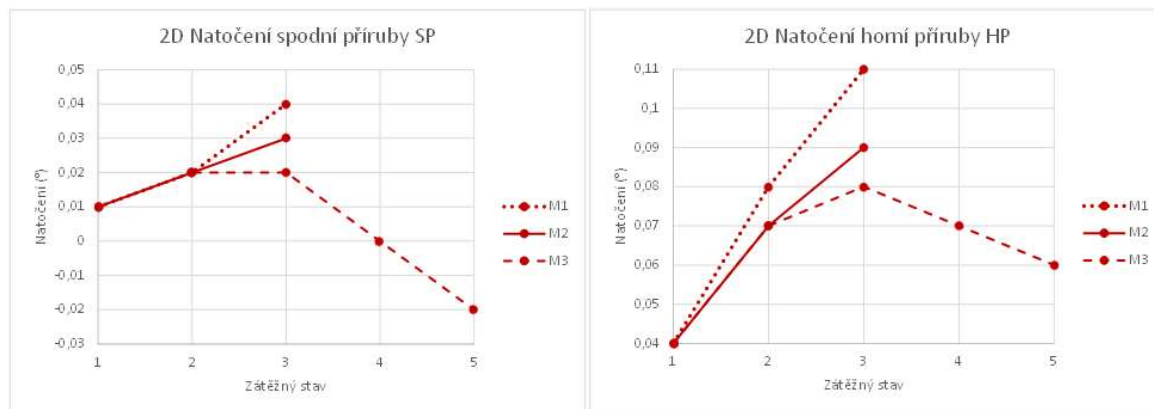
Bodové vyhodnocení posuvů na listech přírub i přivařených trubkách je na Obr. 5-19. Rozdíl hodnot ve vzdálenosti kontrolních bodů na horní a spodní trubce je vyhodnocován jako stlačení těsnění.



Obr. 5-19 Grafy zobrazující průběh přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo). (2D Radial)

5.3.3 Rotace příruby

Z bodu na listu příruby byla vyhodnocena i rotace. Z grafů (Obr. 5-20) je patrný průběh rotace vzniklý vlivem zatěžování.

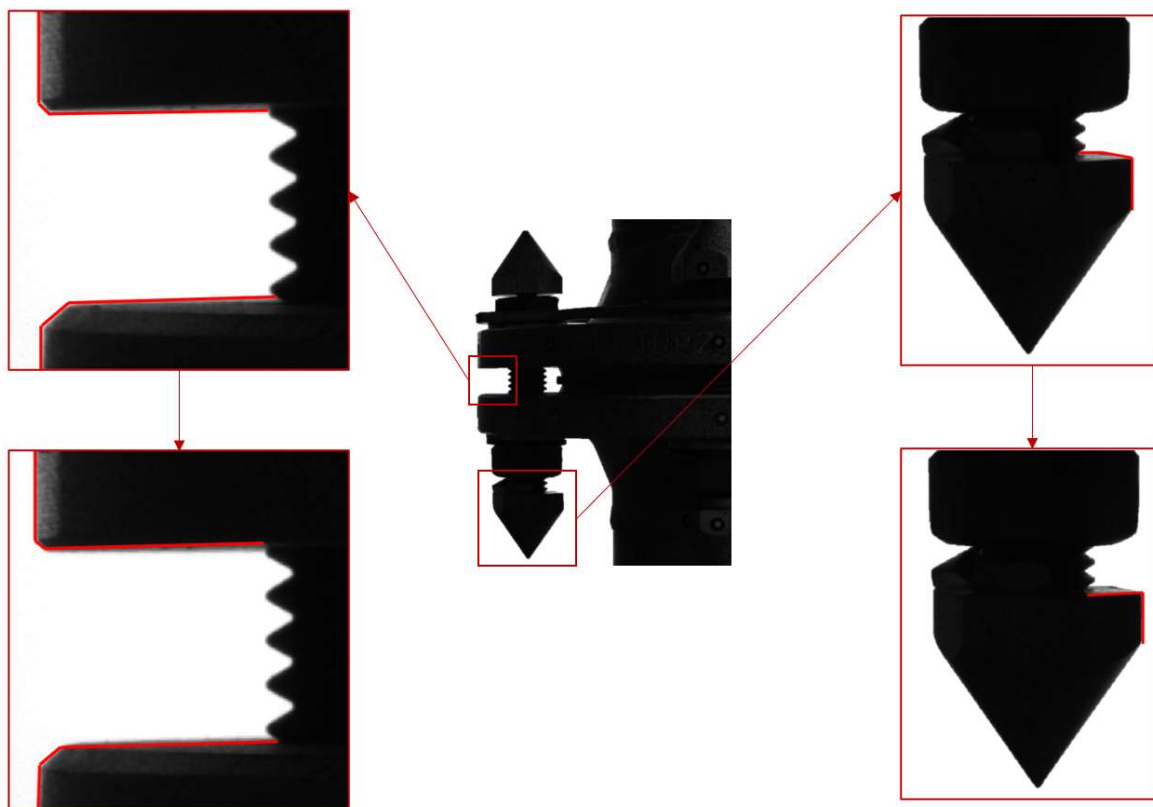


Obr. 5-20 Grafy zobrazující natočení spodní (SP) (vlevo) a horní (HP) (vpravo) příruby. (2D Radial)

Ze všech uvedených grafů je čitelný jasný trend v důsledku zatěžování rostoucím utahovacím momentem nebo teplotou. Metoda je dostatečně přesná i citlivá na velikost vznikajících deformací. Její omezení je v množství získávaných dat a vytváření měřítka při získávání absolutních hodnot. V praxi by měřítko nemuselo být tak velký problém, pokud by byla vyhodnocována například procentuální změna. Další nevýhoda plyne z citlivosti na odchylky na zakřivených plochách, což znemožňuje měření ve více než jedné svislé ose z jednoho úhlu záběru. Toto omezení opět neplatí při vyhodnocování relativních hodnot posuvů.

5.4 2D Siluety (Aramis)

Při měření 2D siluet nebyl použitý fotoaparát s telecentrickým objektivem, a tudíž byla na snímcích zachována perspektiva. Z toho důvodu bylo nutné nastavení detekované prahové hodnoty (threshold for gray values) pro výběr reálně měřených hran.

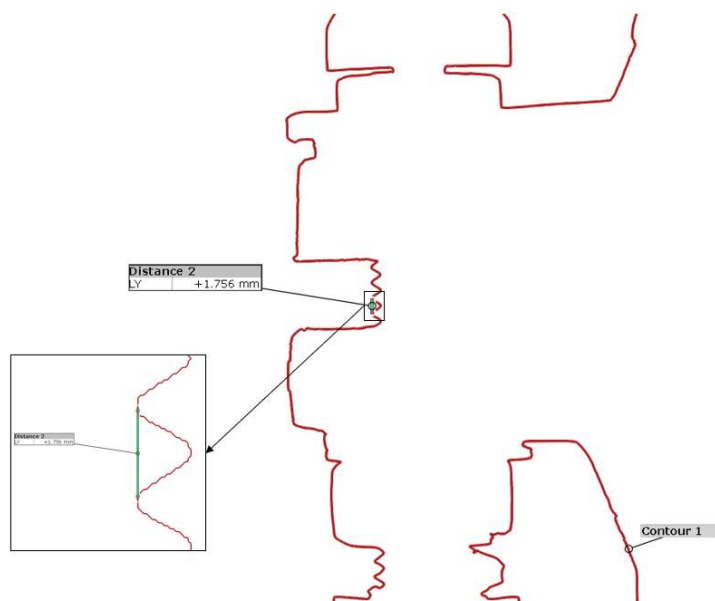


Obr. 5-21 Úprava výběru detekovaných hran. (2D Siluety)

Další možné parametry nastavení vygenerování kontury jsou:

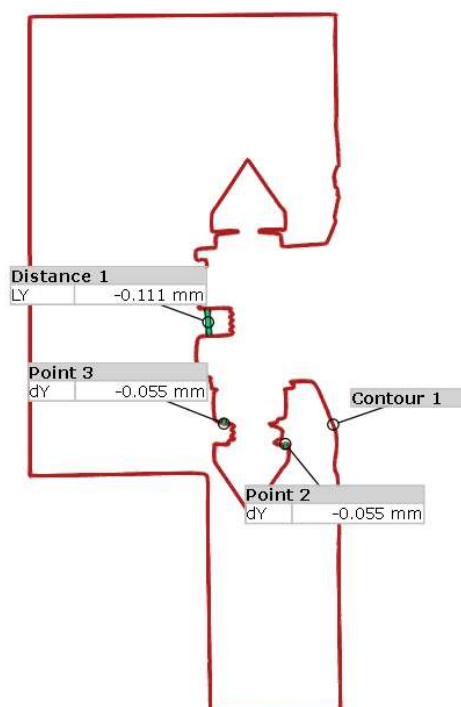
- Gaussův filtr (Sigma for Gaussian filter): odstranění šumu z obrazu před vygenerováním kontury,
- Maximální vzdálenost použitých bodů (Max distance of used points): definuje uvažovanou vzdálenost, kde bude program hledat konturu při přerušení (např. stínem nebo texturou povrchu),
- Vyhlazení kontury (Smooth contour): vlivem tohoto vyhlazení dochází k menším odchylkám než při užití Gaussova filtru,
- Vytvoření konvexního tvaru (Compute as convex hull): generovaný tvar je konvexní tudíž je použito mnohem méně bodů.

Po vygenerování kontury bylo nejdříve ověřeno měřítko, které bylo definováno průměrem příruby 140 mm. Kontrola probíhala změřením známé hodnoty z obrazu, v tomto případě rozteč šroubu (Obr. 5-22). Naměřená hodnota byla 1,756 mm oproti standartní rozteči závitu M12, která je 1,75 mm.



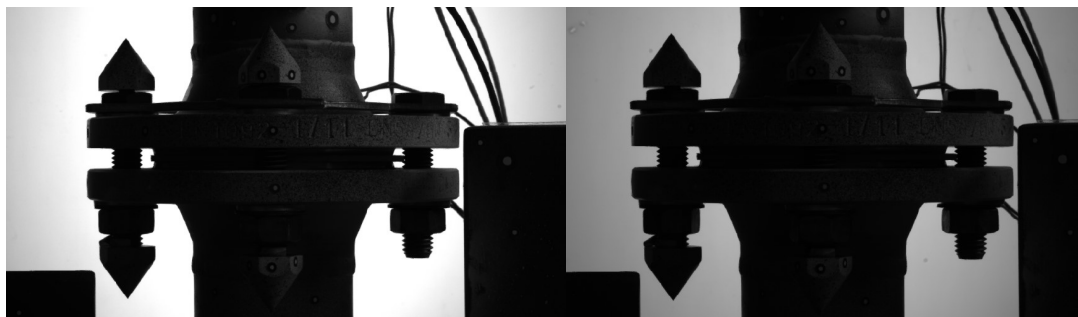
Obr. 5-22 Kontrola přesnosti měřítka. (2D Siluety)

Při vyhodnocení posuvů byla spočítána velikost jednoho pixelu. Šířka obrazu v měřítku je přibližně 260 mm a počtem pixelů 4656, tudíž velikost jednoho pixelu je 0,055 mm. Jak je patrné z Obr. 5-23, tato zkušební verze skriptu pro vyhodnocování siluet pracuje v pixelové přesnosti, která je pro tento typ vyhodnocení nedostatečná. Z toho důvodu nebudou žádné posuvy vyhodnocovány a srovnávány.



Obr. 5-23 Vyhodnocení základních posuvů v obraze. (2D Siluety)

Další teoretické nepřesnosti by vznikly měnícím se kontrastem a změnou odstínů šedi v jednotlivých snímcích. Tyto odchylky na pixelové úrovni mohou být v tomto případě teoreticky srovnatelné s hodnotou vyhodnocovaných posuvů při nižších zatížení. Na Obr. 5-24 je vidět změna, která pravděpodobně vznikla posuvem osvětlení, které nebylo zafixované.



Obr. 5-24 Změna kontrastu mezi M1_25 (vlevo) a M1_44 (vpravo). (2D Siluety)

5.5 Srovnání metod

V následujících podkapitolách budou porovnány jednotlivé metody mezi sebou. Vyhodnocování bude pomocí korelačního koeficientu dat a hodnoty průměrné a maximální odchylky od referenčních dat. Jako reference bylo stanoveno skenování (pokud není v tabulce stanoveno jinak). Měřicí objem je $1,5 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$.

5.5.1 Srovnání vyhodnocení přiblížení přírub

Rozměr A (přiblížení přírub) byl vyhodnocen ve všech typech měření. V tabulce Tab. 5-3 jsou vypsané porovnávané hodnoty (s obráceným znaménkem).

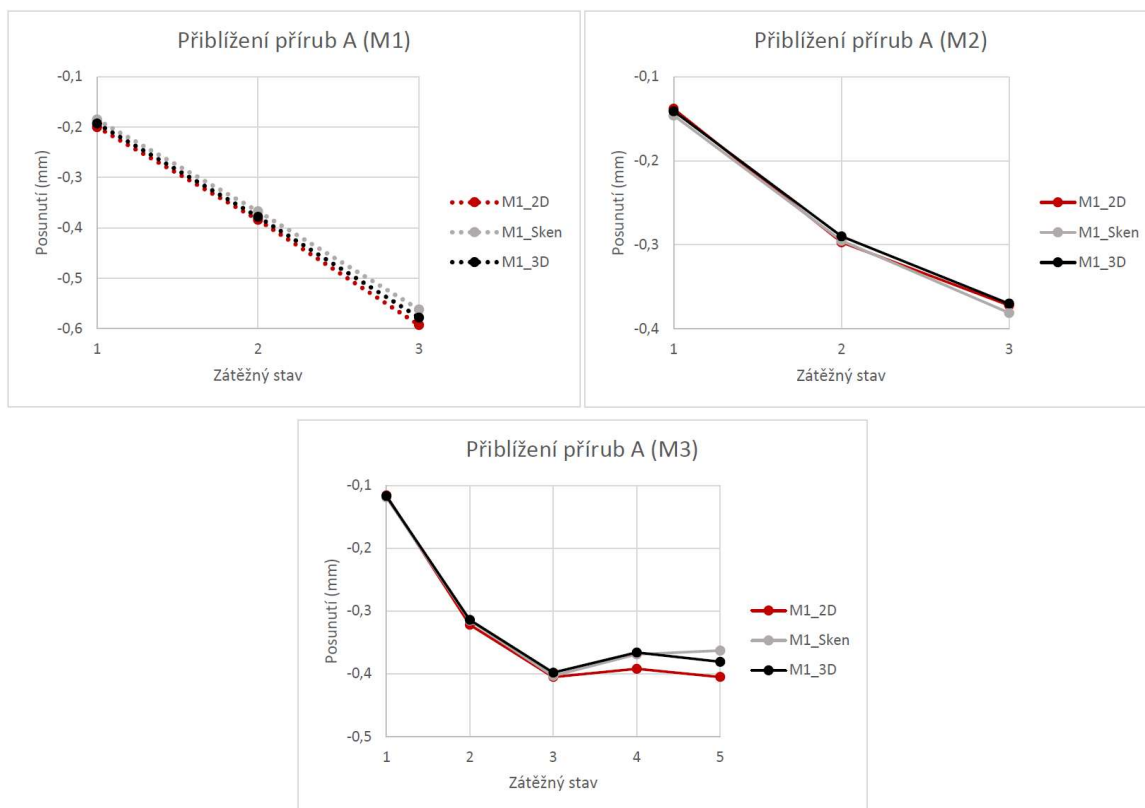
Tab. 5-3 Tabulka hodnot přiblížení přírub A. (mm)

	M1_44	M1_66	M1_80	M2_44	M2_66	M2_80	M3_44	M3_66	M3_80	M3_80 110	M3_80 30
Sken	0,185	0,367	0,562	0,146	0,295	0,381	0,119	0,315	0,403	0,369	0,363
3D	0,193	0,378	0,578	0,141	0,290	0,370	0,117	0,314	0,398	0,366	0,381
2D R	0,2	0,384	0,593	0,138	0,297	0,372	0,116	0,322	0,405	0,392	0,405

Vyhodnocení tohoto rozměru se jeví jako nejjednodušší a nejstabilnější. Míra korelace je pro tento rozměr největší ze všech typů měření. Všechny vyhodnocované koeficienty jsou uvedeny v Tab. 5-4.

Tab. 5-4 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rozměru A.

	Korelační koeficient		Průměrná odchylka	Maximální odchylka
	Sken	3D	-	-
Sken	-	-	-	-
3D	0,998	-	0,0077	0,018
2D R	0,995	0,998	0,0145	0,042



Obr. 5-25 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru A.

Na grafech (Obr. 5-25) je vidět jasný průběh ovlivnění utahováním i následné ovlivnění teplotou. Toto měření v případě 2D úlohy pomocí dvou nalepených bodů se jeví jako vhodný způsob pro revizi spoje. V případě vyhodnocení 3D nebo skenu se získávají komplexní průběhy dávající možnost přesného zkoumání konkrétních vlivů.

5.5.2 Srovnání vyhodnocení stlačení těsnění

Odečtené hodnoty stlačení těsnění jsou zaznamenány v Tab. 2-1, také s převráceným znaménkem.

Tab. 5-5 Tabulka hodnot stlačení těsnění D. (mm)

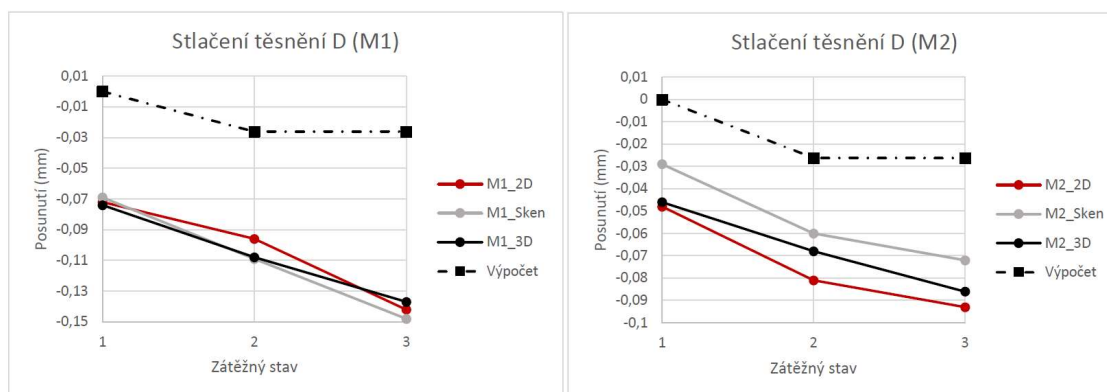
	M1_44	M1_66	M1_80	M2_44	M2_66	M2_80	M3_44	M3_66	M3_80	M3_80 110	M3_80 30
Sken	0,069	0,109	0,148	0,029	0,060	0,072	0,062	0,105	0,098	0,064	0,258
3D	0,074	0,108	0,137	0,046	0,068	0,086	0,046	0,086	0,089	0,058	0,220
2D R	0,072	0,096	0,0142	0,048	0,081	0,093	0,053	0,082	0,089	0,053	0,249

Vyhodnocení stlačení těsnění prokazuje opět vysokou stabilitu napříč typy měření. Porovnávací koeficienty jsou zaznamenány v Tab. 5-6.

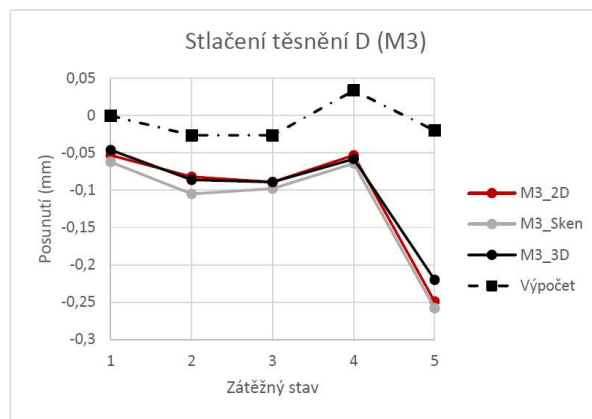
Tab. 5-6 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rozměru D.

	Korelační koeficient		Průměrná odchylka	Maximální odchylka
	Sken	3D	-	-
Sken	-	-	-	-
3D	0,981	-	0,0131	0,038
2D R	0,971	0,988	0,0131	0,023

Z grafů (Obr. 5-27 a Obr. 5-27) je patrné, že naměřené hodnoty jsou velmi rozdílné od vypočítaných. Tato odchylka je způsobena především tím, že výpočet pracuje s dokonale tuhou přírubou a není možné do něj zanést vliv použité předpjaté podložky. Další odchylka vznikla rozdílem mezi reálně použitým a ve výpočtu použitým těsněním. Nicméně všechny tyto vlivy jsou běžnou součástí praxe, a tudíž je nutné mít nástroje pro jejich vyhodnocení.



Obr. 5-26 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru D.



Obr. 5-27 Graf zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru D.

Možnost vyhodnocení stlačení těsnění je pro reálný provoz důležitá už jen kvůli tomu, že existuje výpočet pouze pro těsnění v hlavním silovém toku. Jak je ale patrné z grafu (Obr. 5-27), tak hodnota je výpočtově podceňovaná, popřípadě se v ní neodráží všechny vlivy reálných podmínek provozu. V případě těsnění ve vedlejším silovém toku (těsnění vkládané do drážky s tím, že protichůdné kontaktní plochy se utahují tak, aby na sebe doléhaly) neexistuje žádný spolehlivý výpočtový model.

Reálné stlačení v důsledku relaxace materiálu je daleko výraznější, než předpokládá výpočet, kde hodnota stlačení vlivem relaxace nevychází jako vyšší než před zahřátím. Reálně naměřená data ukazují více než dvojnásobný nárůst. Tudíž nesouhlasí jen podhodnocené hodnoty, ale i trend změny, který byl výpočtově vyhodnocen jako výrazně bezpečnější.

Vyhodnocení tohoto rozměru je pro provoz zásadní a možnost kontroly pomocí dvou bodů je v případě 2D úlohy velice efektivní. Stejně jako při vyhodnocování přiblížení přírub ostatní metody nabízejí možnost komplexní analýzy například při testování a vývoji nových materiálů.

5.5.3 Srovnání vyhodnocení posuvů na šroubu

Vyhodnocení rozdílů (dY) bylo naměřeno pouze ve skenech a 3D úlohách. Hodnoty pro hlavu (H) a volný konec šroubu (D) jsou zaznamenány v tabulce Tab. 5-7 (bez zachování znaménka, to je promítnuto v grafech).

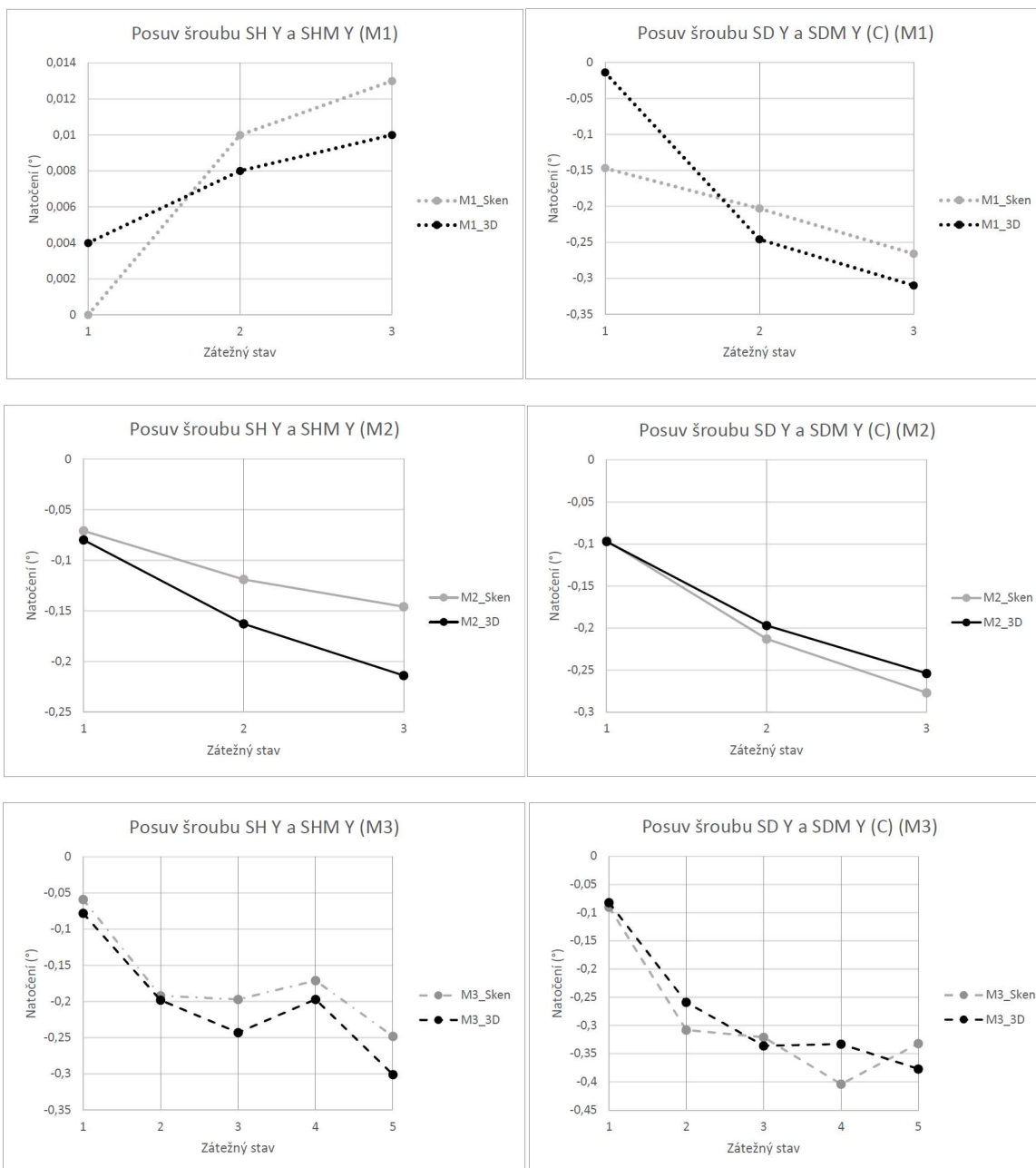
Tab. 5-7 Tabulka hodnot porovnávající vyhodnocení posuvů na šroubu. (mm)

	M1_44	M1_66	M1_80	M2_44	M2_66	M2_80	M3_44	M3_66	M3_80	M3_80 110	M3_80 30
Sken D	0,147	0,203	0,266	0,096	0,213	0,277	0,090	0,308	0,321	0,404	0,332
3D D	0,140	0,246	0,310	0,097	0,196	0,254	0,082	0,259	0,336	0,333	0,377
Sken H	0	0,01	0,013	0,071	0,119	0,146	0,059	0,192	0,197	0,171	0,248
3D H	0,004	0,008	0,010	0,080	0,163	0,214	0,078	0,198	0,243	0,197	0,301

Hodnoty (Tab. 5-8) míry korelace jsou v případě volného konce šrouby nižší, což mohlo být způsobeno vyhodnocováním skenovaného dílu. Plochy kužele jsou v porovnání s celou sestavou malé a nebyl brán zvláštní zřetel na jejich snímání, a proto je možné, že v některých případech vytvořený model nemá dostatečnou kvalitu. Chyba vzniklá možný pootočením kužele je v tomto případě zanedbatelná, protože bude v obou vyhodnoceních stejná.

Tab. 5-8 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení posuvů na šroubu.

Korelační koeficient		Průměrná odchylka	Maximální odchylka
Sken H	Sken D	-	-
3D H	0,987	-	0,0255
3D D	-	0,886	0,0294
			0,068
			0,071



Obr. 5-28 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení posuvů na šroubu.

Z grafů (Obr. 5-28) je opět čitelný vliv měnícího se aplikovaného utahovacího momentu i teploty. S rostoucí teplotou i relaxací se měřené deformace zvýšily, což poukazuje na nutnost kontroly, která nemůže být, vzhledem k bezpečnosti stejně jako u jiných rozměru za teplotního zatěžování, prováděna za přítomnosti obsluhy.

Největší výhodou 3D vyhodnocení v Aramisu je nepochybně možnost vygenerování dilatací ve všech směrech současně, z jednoho bodu a při jednom ustavení. Vzhledem k tomu, že úhel šroubu (potažmo matice) hraje zásadní roli ve velikosti přenášené síly, tak se toto vyhodnocení jeví jako možnost podrobného zkoumání konkrétních aplikací. Je však nutné poznamenat, že v provozu by se musely použít jiné metody pro vytvoření měření. Jednou z možností, která se nabízí je využití možnosti generování kontrolního bodu ze skvrnitého vzoru, který byl na šroub naleptán stejně jako ve studii [21]. Výhodou by byla možnost vytvoření vzoru před smontováním příruby a jeho stabilita vůči mechanickému poškození.

5.5.4 Srovnání vyhodnocení rotací přírub

Rotace přírub je vyhodnocena, jak z hlediska neměřených posuvů, tak přepočítání do úhlových stupňů. Hodnoty (Tab. 5-9) byly odečteny z horní (H) a spodní (S) příruby. Malá písmena *p* a *s* odkazují na hodnotu posuvu a přepočítanou hodnotu ve stupních.

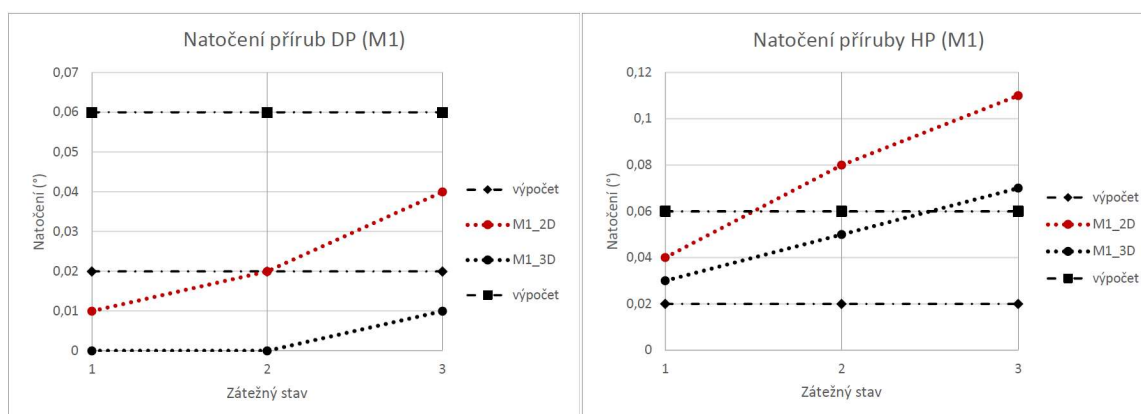
Tab. 5-9 Tabulka hodnot porovnávající vyhodnocení rotace přírub. (mm)

	M1_44	M1_66	M1_80	M2_44	M2_66	M2_80	M3_44	M3_66	M3_80	M3_80 110	M3_80 30
3D Hs	0,03	0,05	0,07	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
2D Hs	0,04	0,08	0,11	0,04	0,07	0,09	0,04	0,07	0,08	0,07	0,06
3D Hp	0,034	0,059	0,082	0,032	0,038	0,050	0,030	0,042	0,047	0,064	0,058
2D Hp	0,044	0,095	0,132	0,049	0,089	0,113	0,043	0,084	0,096	0,089	0,078
3D Ss	0	0	0,01	0	-0,01	-0,01	0	0	0	0	0
2D Ss	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0	-0,02
3D Sp	0,005	0,006	0,011	-0,050	-0,015	-0,018	0,001	0	-0,002	0,006	-0,005
2D Sp	0,009	0,022	0,039	0,014	0,028	0,035	0,008	0,019	0,027	-0,006	-0,019

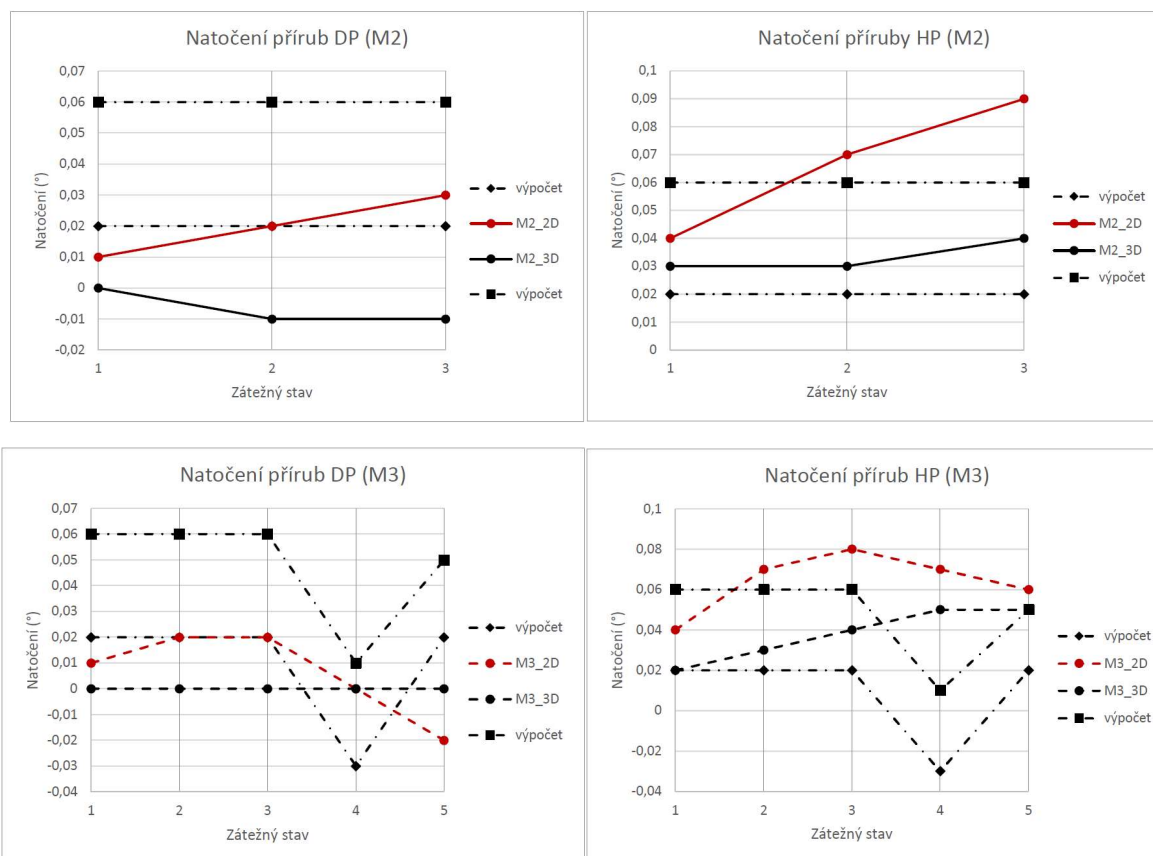
Jak je patrné z hodnot korelačních koeficientů (Tab. 5-10), tak hodnoty posuvů na spodní přírubě nemají žádnou závislost. Ve vyhodnocení 3D měření vychází veškeré posuvy téměř nulové bez zjevného trendu vývoje. Oproti tomu hodnoty ze 2D měření naznačují teoreticky předpokládaný vývoj rotace při utahování i následném teplotním testu a relaxaci. Ve 2D úloze nemohly být vyhodnoceny žádné další body po obvodu příruby kvůli rostoucí odchylce vlivem zakřivení. Ověření hodnot náhodně rozmístěných po viditelné ploše měřeného listu ve 3D měření potvrdilo výsledky z lepeného bodu, přičemž data kolísala v jednotkách tisícín milimetru.

Tab. 5-10 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rotace přírub.

	Korelační koeficienty				Průměrná odchylka s				Maximální odchylka k			
	Hp	Hs	Sp	Ss	Hp	Hs	Sp	Ss	Hp	Hs	Sp	Ss
2D												
3D Hp	0,806	-	-	-	0,0342	-	-	-	0,063	-	-	-
3D Hs	-	0,762	-	-	-	0,0282	-	-	-	0,05	-	-
3D Sp	-	-	-	-	-	-	0,0222	-	-	-	0,053	-
3D Ss	-	-	-	0,054	-	-	-	0,0162	-	-	-	0,04



Obr. 5-29 Grafy znázorňující porovnání vyhodnocení rotace přírub (část 1).



Obr. 5-30 Grafy znázorňující porovnání vyhodnocení rotace přírub (část 2).

Do grafů (Obr. 5-29 a Obr. 5-30) jsou zaneseny i hodnoty z výpočtu (Tab. 5-11), ze kterých byly vytvořené dvě křivky tvořící rozmezí předpokládaného pohybu, které je pro obě příruby stejné.

Tab. 5-11 Tabulka vypočítaného rozsahu rotace přírub. (°)

	Rozmezí dané výpočtem	Min. dopočítaná rotace	Max. dopočítaná rotace
25	0,12-0,14	-	-
44	0,14-0,18	0,02	0,06
66	0,14-0,18	0,02	0,06
80	0,14-0,18	0,02	0,06
80_110	0,09-0,13	-0,3	0,01
80_30	0,14-0,17	0,02	0,05

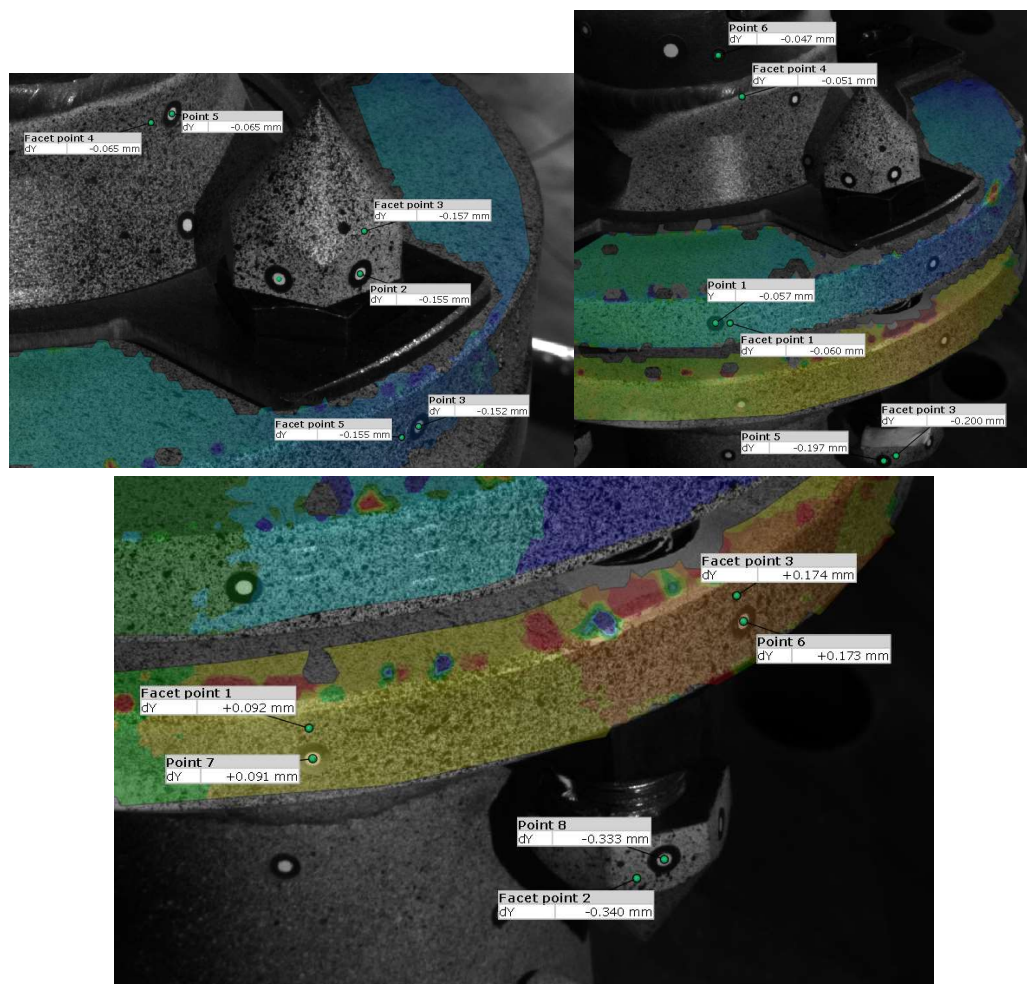
Srovnání dat opět naznačuje nepřesnost výpočtových dat s důsledkem podcenění rotace, což bude způsobeno hlavně aproximací na dokonale tuhé díly.

Odchylka mezi daty v natočení horní příruby je částečně způsobena zakřivením listu a zároveň reálným úhlem snímání. V případě, že kamera nebyla dokonale kolmá na snímanou rovinu mohlo dojít ke zkreslení dat. Kvůli tomuto faktu se může mírně lišit souřadnicový systém 2D a 3D.

Výrazný rozdíl v měření na spodní přírubě není nijak objektivně opodstatněn, protože využívané body jsou použity i v jiných měřeních s dobrými výsledky, tudíž nemohou být nijak poškozeny. Zároveň hodnota rotace ve 3D byla potvrzena dalšími body po obvodu příruby.

5.5.5 Srovnání vyhodnocení pomocí lepených bodů a bodů vytvořených ze skvrnitého vzoru

Pro vyhodnocení přesnosti různých typů bodů v měření byly z každého měření vybrané náhodné body (Obr. 5-31) a v jejich blízkosti vytvořen bod vygenerováním ze skvrnitého vzoru.



Obr. 5-31 Zvolene body pro vyhodnocení M1_44 (vpravo nahoře), M2_66 (vlevo nahoře) a M3_80_110 (dole).

Tab. 5-12 Tabulka vyhodnocovaných bodů.

					Korelační koeficient	Průměrná odchylka	Maximální odchylka
3D	M1_44	Generovaný bod	-	-	0,999	0,0017	0,003
			0,065	0,157			
		Kontrolní bod	-	-	0,999	0,0033	0,004
			0,065	0,155			
	M2_66	Generovaný bod	-	-	0,999	0,006	0,007
			0,051	0,060			
		Kontrolní bod	-	-	0,999	0,006	0,007
			0,047	0,057			
	M3_80_110	Generovaný bod	0,92	0,340	0,999	0,006	0,007
			0,92	0,340			
		Kontrolní bod	0,91	0,333	0,999	0,006	0,007
			0,91	0,333			

Z tabulky (Tab. 5-12) je možné vyčíst, že vyhodnocování pomocí generovaných bodů ze vzoru povrchu vykazuje stejné výsledky jako pomocí lepených bodů. Hodnoty jsou stabilní i při měření za teploty 110 °C.

6 DISKUZE

V rámci diplomové práce byly hodnoceny optické systémy podle vhodnosti k měření přírubových spojů. Na základě rešerše byly definovány čtyři měřicí metody s odlišnou složitostí implementace do průmyslu a šíří poskytovaných výsledků. Přírubový spoj byl postupně zatěžován a simultánně snímán všemi využitými zařízeními, aby bylo možné následné porovnání hodnot. Srovnání metod vyhodnocuje přesnost a možnosti jednotlivých systémů.

Na základě rešerše byl stanoven způsob zatěžování příruby, který simuluje reálné podmínky přímo ovlivňující těsnost spoje. Jedná se o proces utahování a teplotního zatěžování a s ním spojenou relaxací materiálu. Pro efektivní způsob měření bylo vytvořeno experimentální zařízení, které umožňovalo současné měření všemi systémy a zároveň simulovalo reálné podmínky při provozu ve smyslu uchycení příruby. Podle požadavků jednotlivých metod byla příruba povrchově upravena, jak ve smyslu zmatňujícího kontrastního vzoru, tak lepených kontrolních bodů pro skenování nebo zanesení měřítka do 2D (Radial) vyhodnocení. Metoda Siluet je jedinou metodou, která nevyžaduje žádné úpravy povrchu nebo speciální prvky sestavy, jelikož se dá měřítko efektivně vytvořit ze známých rozměrů v obraze.

Optické měření na základě rozdílu v generované siluetě obrazu použité při měření celé příruby teoreticky nemůže dosáhnout stejných přesností jako u ostatních metod, protože je v obraze zachovaná perspektiva, která vytváří falešné hrany. Využití telecentrického objektivu by teoreticky umožnilo odstranění stínů, ale při velikosti snímáné scény by byly finanční náklady na jeho pořízení vyšší než náklady na kalibrované optické systémy umožňující 3D vyhodnocení. Dalším omezujícím faktorem je vytváření odchylek kvůli měnícímu se kontrastu během snímků, což vyžaduje nutnost editace vyhodnoceného odstínu šedi. Metoda z těchto důvodů není vhodná ani jako možnost rychlého vyhodnocení relativních odchylek, popřípadě procentuálních změn. Vzhledem k tomu, že využitý software vyhodnocoval změny v obraze pouze na pixelové úrovni, tak žádné posuvy nebyly vyhodnocovány, a tudíž ani porovnávány s jinými metodami.

Vyhodnocení vzniklých deformací pomocí skenování poskytuje komplexní data převeditelná na průběh kontaktního tlaku nebo přímo těsnosti spoje. V práci byl vyhodnocen průběh posuvů na polovině příruby, který prokázal rozdíly v utažení jednotlivých šroubů. Tento rozdíl vzniknul postupem utahování, což simuluje lidský faktor v reálném provozu. Jasný vliv byl prokázán i v případě měření teplotních dilatací a následné relaxace. Hlavním omezením metody je zástavbová velikost skeneru při snímání a nutnost změn pozic skenovací hlavy vyžadující lidskou obsluhu.

Data zpracována v softwaru využívající 3D digitální korelaci obrazu dosahovala stejné přesnosti jako skenování. Omezení plyne ze snímání z jedné pozice streopárem kamer, čímž není umožněno nasnímat horní i spodní plochu příruby současně, popřípadě větší část vnitřních ploch listů. Nicméně i oblast nasnímaná touto metodou poskytla, díky plošnému vyhodnocení, obraz průběhu deformace mezi šrouby. Jako největší výhoda metody oproti skenování se jeví možnost vyhodnocování rotací na všech dílech sestavy při jednom ustavení snímků. Komplexní data posuvů na šroubu poskytují vyhodnocení vedoucí k velikosti síly přenášené do spoje, která přímo ovlivňuje jeho těsnost.

Poslední použitá metoda je vyhodnocení 2D snímků z radiálního pohledu pomocí digitální korelace obrazu a posuvu na nalepených kontrolních bodech. Základní vyhodnocení rozměrů dosáhlo stejných přesností jako dva předchozí systémy. Nevýhoda metody plyne z odchylek vznikajících díky křivosti součástí. V absolutních hodnotách není možné vyhodnocovat žádné jiné oblasti než posuvy v teoretické ose vzniklé v tečné rovině k rotačnímu dílu. I přes tyto odchylky byla vykreslena barevná mapa po celé šíři příruby s jasně viditelným trendem měnící se velikosti posuvu v oblasti mezi šrouby.

Všechny použité vyhodnocené metody dosahovaly stejné přesnosti i citlivosti na vznikající deformace. Jejich užití při reálném provozu je určeno cílovými požadavky uživatele. Vzhledem k tomu, že vliv relaxace se podle vyhodnocení skenů jeví jako konstantní, tak je možné ovlivnění teplotou měřit pouze jako rozdíl ve dvou vhodně určených bodech pomocí 2D snímání. Toto neplatí pro vyhodnocení utahování, kde byl podle studií prokázán vznik netěsnosti spoje jedním špatně utaženým šroubem. Podle výsledků deformací v oblasti šroubu měřeném všemi systémy by byl spoj prohlášen za funkční bez odhalení odchylky šroubu měřeném pouze skenováním. Z toho plyne, že těsnost spoje z hlediska utažení šroubů je nutné vyhodnocovat na všech šroubech.

Ze všech výsledků se využití optických systémů na měření přírubových spojů jeví jako vhodný způsob kontroly, popřípadě zdroj komplexních dat. Nejjednodušší metoda představuje použití kamery s neměnnou pozicí vůči scéně, která bude snímat dva kontrolní body vyhodnocující změny ve stlačení těsnění.

7 ZÁVĚR

Práce zkoumala možnosti měření vlivu provozních podmínek přírubových spojů optickými metodami s různou šíří poskytovaných dat. Cílem bylo ověření přesnosti a citlivosti jednotlivých systému a s tím spojené definování využitelnosti v praxi.

Pomocí měření na experimentálním zařízení byla získána data posuvů na plochách příruby a šroubovém spoji, ze kterých byly vyhodnocovány jednotlivé rozměry ovlivňující těsnost spoje. Získané deformace byly porovnány podle míry shody napříč využitými metodami. Z výsledků je jasné patrné, že všechny metody dosahují stejné míry citlivosti a přesnosti, tudíž se vhodnost aplikace do konkrétních podmínek musí posuzovat z hlediska širě potřebných dat k požadované analýze spoje.

Při porovnání naměřených reálných dat s hodnotami normovaného výpočtu byl zaznamenán opakující se trend podhodnocování reálně vznikajících deformací, ať vlivem zjednodušení definice přírub jako dokonale tuhých dílů nebo nezahrnutí všech členů spoje. Vypočítané hodnoty nejen podceňovaly ty reálné, ale předpokládaly dokonce opačný důsledek v případě vlivu relaxace. Hodnoty stlačení těsnění byly až dvakrát vyšší, než bylo výpočtově hodnoceno. I kvůli tomuto faktu je nutné zavést stabilní dostatečně přesné vyhodnocení provozních vlivů.

Tato diplomová práce shrnuje požadavky na optické měření přírubových spojů jak z hlediska požadavků provozu, tak možnosti vyhodnocení. Definuje rozsahy jednotlivých optických systémů a jejich využitelnost při kontrole různých prvků definujících těsnost spoje s možnostmi zavedení do reálného provozu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN ISO 2768-1. *Všeobecné tolerance. Nepředepsané mezní úchylky délkových a úhlových rozměrů*. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 1992
- [2] ČSN ISO 2768-2. *Všeobecné tolerance. Část 2: Nepředepsané geometrické tolerance*. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 1994
- [3] ASME PCC-1–2010. *Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly*. B.m.: New York: The American Society of Mechanical Engineers. 2013
- [4] ČSN EN 1591-1. *Příruby a přírubové spoje - Pravidla pro navrhování těsných kruhových přírubových spojů - Část 1: Výpočet*. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 2015
- [5] BICKFORD, John. *Handbook of Bolts and Bolted Joints*. Boca Raton: CRC Press, 1998. ISBN 9781482273786.
- [6] NASSAR, Sayed A. a Meng AIDONG. Optical monitoring of bolt tightening using 3D electronic speckle pattern interferometry. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*. 2007, roč. 129, č. 1, s. 89–95. ISSN 00949930.
- [7] UNIPETROL RPA S.R.O. *Přírubové spoje – demontáž, montáž a značení*. 2017 [vid. 26. leden 2020]. Dostupné z: https://www.unipetrolrpa.cz/CS/sluzby-areal/chempark-zaluzi/N_normy/N_13/N13132/N_13132.pdf
- [8] ČSN EN 806-4. *Vnitřní vodovody pro rozvod vody určené k lidské spotřebě - Část 4: Montáž*. B.m.: Praha: Český normalizační institut. 2010
- [9] SEPS A.S. *Diagnostika přírubových spojů, přírub a svorníků*. [vid. 26. leden 2020]. Dostupné z: <https://www.sepssk.sk/diagnostika-kontrola-prihub-spoj-svornik>
- [10] MARSHALL, MB, R LEWIS, T HOWARD a H BRUNSKILL. Ultrasonic measurement of self-loosening in bolted joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2012, roč. 226, č. 7, s. 1869–1884. ISSN 0954-4062.
- [11] LANNEWEHR + THOMSEN GMBH & CO. KG. *flangevalid*. [vid. 27. leden 2020]. Dostupné z: <https://flangevalid.com/index.php>
- [12] AMTEC MESSTECHNISCHER SERVICE GMBH. *AMTEC Advanced Measurement Services*. [vid. 27. leden 2020]. Dostupné z: <https://www.amtec.eu/home.html>
- [13] MANN, J. Adin, Jeremy HILSABECK, Cale MCKOON a Courtnee JACKSON. Bolted flanged joint creep/relaxation results at high temperatures. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*. 2014, roč. 3, s. 1–7. ISSN 0277027X.
- [14] CHAUDHARI, U. M., A. R. GANESAN, Chandra SHAKHER, P. B. GODBOLE a R. S. SIROHI. Investigation of in-plane stresses on bolted flange joints using digital speckle pattern interferometry. *Optics and Lasers in Engineering*. 1989, roč. 11, č. 4, s. 257–264. ISSN 01438166.
- [15] TREBUŇA, František, Miroslav PÁSTOR, Róbert HUŇADY, Peter FRANKOVSKÝ a Martin HAGARA. *Optické metody v mechanice*. Košice: TYPOPRESS, Vydavateľstvo a tlačiareň, 2017. ISBN 978-80-553-3168-3.

- [16] SUTTON, Michael A., Jean-José ORTEU a Hubert W. SCHREIER. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2009. ISBN 978-0-387-78746-6.
- [17] JAHODA, J a J VALACH. Měření posunutí metodou korelace obrazů. 2009.
- [18] HUANG, Y. H., L. LIU, T. W. YEUNG a Y. Y. HUNG. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation. *Optics and Laser Technology*. 2009, roč. 41, č. 4, s. 408–414. ISSN 00303992.
- [19] JIMÉNEZ-PEÑA, Carlos, Alberto LAVATELLI, Ruben BALCAEN, Barbara ROSSI a Dimitri DEBRUYNE. Model Based Bolt Preload Monitoring Using Digital Image Correlation. *Proceedings*. 2018, roč. 2, č. 8, s. 514. ISSN 2504-3900.
- [20] ZIAJA, Dominika, Barbara TURON a Bartosz MILLER. Detection of anomaly in a pretensioned bolted beam-to-column connection node using digital image correlation and neural networks. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2020, roč. 10, č. 7. ISSN 20763417.
- [21] GERBO, Evan J., Ashley P. THRALL a Theodore P. ZOLI. Adjustable Bolted Steel Plate Connection: Measured Behavior of Bolts during Field Installation and Numerical Parametric Investigation. *Journal of Structural Engineering*. 2020, roč. 146, č. 2, s. 04019189. ISSN 0733-9445.
- [22] FIALA, Pavel, Ivan RICHTER a Zbyněk RYZÍ. *Interference světla*. 1998 [vid. 4. březen 2020]. Dostupné z: <http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/optika/node7.html>
- [23] CHA, Young Jin, Kisung YOU a Wooram CHOI. Vision-based detection of loosened bolts using the Hough transform and support vector machines. *Automation in Construction*. 2016, roč. 71, č. Part 2, s. 181–188. ISSN 09265805.
- [24] SAWA, T., T. HIROSE a Y. NAKAGOMI. Behavior of a tapered hub flange with a bolted flat cover in transient temperature field. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*. 1996, roč. 118, č. 1, s. 115–120. ISSN 15288978.
- [25] BOUZID, L. a A. CHAABAN. An accurate method of evaluating relaxation in bolted flanged connections. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*. 1997, roč. 119, č. 1, s. 10–17. ISSN 15288978.
- [26] SCHWINGSHACKL, C. W., D. Di MAIO, I. SEVER a J. S. GREEN. Modeling and validation of the nonlinear dynamic behavior of bolted flange joints. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2013, roč. 135, č. 12, s. 1–8. ISSN 07424795.
- [27] LYONS, J. S., J. LIU a M. A. SUTTON. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation. *Experimental Mechanics*. 1996, roč. 36, č. 1, s. 64–70. ISSN 00144851.
- [28] WANG, Wei, Chenghai XU, Hua JIN, Songhe MENG, Yumin ZHANG a Weihua XIE. Measurement of high temperature full-field strain up to 2000 °C using digital image correlation. *Measurement Science and Technology*. 2017, roč. 28, č. 3. ISSN 13616501.
- [29] PAN, Zhiwei, Shenghong HUANG, Yong SU, Meixia QIAO a Qingchuan ZHANG. Strain field measurements over 3000 °C using 3D-Digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*. 2020, roč. 127, č. September 2019, s. 105942. ISSN 01438166.

- [30] MCAE SYSTEMS S.R.O. *ATOS Triple Scan Profesionální 3D optický skener 3D souřadnicové měření Skenování a inspekce Kontrola kvality výroby a reverzní inženýrství*. 2020 [vid. 10. květen 2021]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_Brochure_ATOS_TripleScan_CZ_nahled.pdf
- [31] MCAE SYSTEMS S.R.O. *Přesná průmyslová 3D metrologie*. 2017 [vid. 10. květen 2021]. Dostupné z: https://www.mcae.cz/wp-content/uploads/2020/10/GOM_brochure_ARAMIS_CZ_nahled_.pdf
- [32] 3D4U TECHNOLOGY. *Tritop*. [vid. 10. květen 2021]. Dostupné z: <http://www.3d4u.com.tr/en/products/tritop/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

2D	dvourozměrný
3D	trojrozměrný
CCD	charge-coupled device
DIC	digitální korelace obrazu
dX	rozdíl ve směru osy x
dY	rozdíl ve směru osy y
dZ	rozdíl ve směru osy z
H	horní
HP	horní příruba
M1	měření č. 1
M1_25	měření č. 1, utahovací moment 25 Nm
M1_44	měření č. 1, utahovací moment 44 Nm
M1_66	měření č. 1, utahovací moment 66 Nm
M1_80	měření č. 1, utahovací moment 80 Nm
M2	měření č. 2
M2_25	měření č. 2, utahovací moment 25 Nm
M2_44	měření č. 2, utahovací moment 44 Nm
M2_66	měření č. 2, utahovací moment 66 Nm
M2_80	měření č. 2, utahovací moment 80 Nm
M3	měření č. 3
M3_25	měření č. 3, utahovací moment 25 Nm
M3_44	měření č. 3, utahovací moment 44 Nm
M3_66	měření č. 3, utahovací moment 66 Nm
M3_80	měření č. 3, utahovací moment 80 Nm
M3_80_110	měření č. 3, utahovací moment 80 Nm, teplota 110 °C
M3_80_30	měření č. 3, utahovací moment 80 Nm, teplota 30 °C po ochlazení
MKP	metoda konečných prvků

NDT		nedestruktivní testování
PD		příruba dolní
PH		příruba horní
S		spodní
SD		šroub dolní
SDM		šroub dolní matice
SH		šroub horní
SHM		šroub horní matice
SP		spodní příruba
VMKŠ		využití meze kluzu šroubů

<i>A</i>	mm	přiblížení listů
<i>B</i>	mm	stlačení podložky
<i>C</i>	mm	protažení šroubu
<i>D</i>	mm	stlačení těsnění
<i>t₀</i>	°C	počáteční teplota přírub
<i>t₁</i>	°C	teplota po zahřátí přírub
<i>t₂</i>	°C	teplota po ochlazení přírub

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Norma ČSN (vlevo) a ASME (vpravo).[1–3]	14
Obr. 2-2 Pootočení děr pro šrouby (norma ASME). [3]	14
Obr. 2-3 Parametry podle normy ČSN EN 1591-1.[4]	15
Obr. 2-4 Grafické znázornění postupů při tlakové zkoušce (A vlevo, B vpravo). [8]	16
Obr. 2-5 Zobrazení výsledného kontaktního tlaku pro různé utahovací momenty (vlevo) a rozklerslení průběhu tlaku v řezu pro 30 Nm (vpravo). Měřeno ultrazvukem. [10]	17
Obr. 2-6 Teplotní analýza příruby (flangevalid). [11]	18
Obr. 2-7 Měření prodloužení pomocí kolíků (Amtec). [12]	18
Obr. 2-8 Schéma měření pomocí skvrnové interferometrie (O-měřený objekt, L-čočky). [14]	20
Obr. 2-9 Konfigurace spoje (vlevo) a měřená oblast (vpravo). [6].....	20
Obr. 2-10 Rozložení deformace získané ze skvrnové interferometrie (μm). [6]	21
Obr. 2-11 Schéma měření s využitím DIC (vlevo) a skvrnitý vzor na podložce (vpravo). [18]	22
Obr. 2-12 Velikosti použitých podložek (vlevo) a detail vzoru využitý k DIC (vpravo). [18]	22
Obr. 2-13 Závislost mezi prodloužením šroubu a předpětím pro délku šroubu 36 mm a 78 mm. [19]	23
Obr. 2-14 Vyhodnocovaná oblast pomocí DIC (vlevo) a konfigurace nedotažených šroubů (vpravo). [20]	24
Obr. 2-15 Měřená konfigurace č. 1. [21]	25
Obr. 2-16 Porovnání mapy napětí vyhodnocené pomocí DIC (vlevo) a MKP (vpravo) při konfiguraci č. 1. [21]	25
Obr. 2-17 Klíčové porovnávané rozměry (vlevo) a detekce středového bodu a zobrazení elipsy (vpravo).[23].....	26
Obr. 2-18 Vyhodnocení uvolněných (b) a utažených (a) šroubů. [23]	27
Obr. 2-19 Graf závislosti axiální síly na rostoucí teplotě při porovnání experimentálních (Exp) a vypočítaných (Num) dat (2b ₂ 0-bez těsnění, 100- poloviční plocha, 175 plné těsnění). [24]	27
Obr. 2-20 Průběh relaxace těsnění v čase (teflonová těsnění).[25]	28

Obr. 2-21 Rozdíl ve velikosti odchylky vlivem použitých skel (vlevo) a teplota vzduchu ve vzdálenosti 3 mm od skla směrem ke kameře bez a při použití ventilátoru pro rozdmychání vzduchu(vpravo). [27]	28
Obr. 2-22 Výsledné zobrazení posuvů při různých teplotách na vzoru z keramického prášku. [28]	29
Obr. 4-1 Blokové schéma postupu práce.	33
Obr. 4-2 Princip snímání povrchu (vlevo) a využití modrého světla (vpravo). [30]	34
Obr. 4-3 Výhodnocení: plošné - statický děj (vlevo) a bodové - dynamický děj (vpravo). [31]	34
Obr. 4-4 Kódované značky a kříž. [32]	35
Obr. 4-5 Kóty hlavních rozměrů příruby.	38
Obr. 4-6 Postup měření při utahování	39
Obr. 4-7 Postup měření při teplotním testu.	39
Obr. 4-8 Schématické zobrazení uložení topné patrony.	41
Obr. 4-9 Základní měřené rozměry.....	42
Obr. 4-10 Základní měřené body.....	42
Obr. 4-11 Možnosti vzhledu lepených bodů.	43
Obr. 4-12 Schématické zobrazení měřících kuželů.....	44
Obr. 4-13 Výsledná příprava povrchu.....	44
Obr. 4-14 Schématické zobrazení základu standu.	45
Obr. 4-15 Schématické zobrazení druhé půlky přírubového spoje.....	46
Obr. 4-16 Schématické zobrazení referenčních desek.....	47
Obr. 4-17 Schématické zobrazení prvků chladicího systému.	47
Obr. 4-18 Schématické zobrazení celkové sestavy a aretace šroubů.	48
Obr. 5-1 Průběh deformace na listech příruby M1_25 (vlevo) a M1_44 (vpravo). (Sken)49	
Obr. 5-2 Průběh deformace na listech příruby M1_66 (vlevo) a M1_80 (vpravo). (Sken)50	
Obr. 5-3 Měření v řezu M1_44 k zjištění hodnot přiblížení přírub. (Sken).....	50
Obr. 5-4 Vyhodnocení posuvů zvlášť na obou přírubách při M1_44. (Sken).....	51
Obr. 5-5 Polární graf zobrazující přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo), pro M1. (Sken).....	51
Obr. 5-6 Graf zobrazující průběh posuvů na šroubu. (Sken).....	52

Obr. 5-7 Graf zobrazující průběh stlačení podložky. (Sken)	52
Obr. 5-8 Barevná mapa posuvů pro M1_25 (nahore), M1_44 (vlevo uprostřed), M2_66 (vpravo uprostřed) a M1_80 s rozdílnou barevnou škálou (dole). (3D)	53
Obr. 5-9 Grafy zobrazující průběh přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo). (3D)	54
Obr. 5-10 Graf zobrazující průběh natočení horní příruby HP. (3D)	54
Obr. 5-11 Grafy zobrazující posuvy (dY) na hlavě šroubu (vlevo) a jeho volném konci (vpravo). (3D)	55
Obr. 5-12 Graf zobrazující posuvy naměřené na hlavě šroubu (M1). (3D)	55
Obr. 5-13 Graf zobrazující posuvy na volném konci šroubu (M1). (3D)	56
Obr. 5-14 Měřítka pro rovinu trubky (vlevo) a rovinu listu příruby (vpravo). (2D Radial)	56
Obr. 5-15 Rozmístění kontrolních bodů pro analýzu odchylek na nerovných plochách. (2D Radial)	57
Obr. 5-16 Barevná mapa posuvů (dY) pro M1_25 (nahore), M1_44 (vlevo dole) a M1_66 (vpravo dole). (2D)	58
Obr. 5-17 Barevná mapa posuvů (dY) pro M1_80. (2D Radial)	59
Obr. 5-18 Barevná mapa posuvů (dY) s absolutními hodnotami pro M1_25 (nahore vlevo), M1_44 (nahore vpravo), M1_66 (dole vlevo) a M1_80 (dole vpravo). (2D Radial)	59
Obr. 5-19 Grafy zobrazující průběh přiblížení listů A (vlevo) a stlačení těsnění D (vpravo). (2D Radial)	60
Obr. 5-20 Grafy zobrazující natočení spodní (SP) (vlevo) a horní (HP) (vpravo) příruby. (2D Radial)	60
Obr. 5-21 Úprava výběru detekovaných hran. (2D Siluety)	61
Obr. 5-22 Kontrola přesnosti měřítka. (2D Siluety)	62
Obr. 5-23 Vyhodnocení základních posuvů v obraze. (2D Siluety)	62
Obr. 5-24 Změna kontrastu mezi M1_25 (vlevo) a M1_44 (vpravo). (2D Siluety)	63
Obr. 5-25 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru A.	64
Obr. 5-26 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru D.	65
Obr. 5-27 Graf zobrazující porovnání vyhodnocení rozměru D.	66
Obr. 5-28 Grafy zobrazující porovnání vyhodnocení posuvů na šroubu.	68
Obr. 5-29 Grafy znázorňující porovnání vyhodnocení rotace přírub (část 1)	70

Obr. 5-30 Grafy znázorňující porovnání vyhodnocení rotace přírub (část 2).	71
Obr. 5-31 Zvolené body pro vyhodnocení M1_44 (vpravo nahoře), M2_66 (vlevo nahoře) a M3_80_110 (dole).	72

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Porovnání hodnot posuvů (v μm) měřených tenzometrem a DIC.	22
Tab. 4-1 Hlavní rozměry příruby.....	38
Tab. 4-2 Výběr těsnicího materiálu.....	39
Tab. 4-3 Vstupní parametry pro výpočet utahovacích momentů.....	40
Tab. 4-4 Vypočítané utahovací momenty.	40
Tab. 4-5 Základní měřené rozměry.....	41
Tab. 4-6 Základní měřené body.....	43
Tab. 5-1 Tabulka průběhu natočení horní (HP) a spodní (SP) příruby. (3D) (mm)	54
Tab. 5-2 Tabulka hodnot pro analýzu odchylek na nerovných plochách. (2D Radial) (mm)	57
Tab. 5-3 Tabulka hodnot přiblížení přírub A. (mm).....	63
Tab. 5-4 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rozměru A.....	64
Tab. 5-5 Tabulka hodnot stlačení těsnění D. (mm)	65
Tab. 5-6 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rozměru D.....	65
Tab. 5-7 Tabulka hodnot porovnávající vyhodnocení posuvů na šroubu. (mm)	67
Tab. 5-8 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení posuvů na šroubu.	67
Tab. 5-9 Tabulka hodnot porovnávající vyhodnocení rotace přírub. (mm)	69
Tab. 5-10 Tabulka koeficientů pro vyhodnocení rotace přírub.....	70
Tab. 5-11 Tabulka vypočítaného rozsahu rotace přírub. ($^{\circ}$)	71
Tab. 5-12 Tabulka vyhodnocovaných bodů.	73

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Tabulka dat z Inspektu. (Sken)	89
Příloha 2 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)). (Sken)	89
Příloha 3 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)). (Sken)	90
Příloha 4 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)). (Sken)	91
Příloha 5 Barevná mapa pro M2. (80_110 (vlevo), 80_30 (vpravo)). (Sken)	91
Příloha 6 Graf přiblížení listů A. (Sken)	92
Příloha 7 Graf přiblížení listů A. (Sken)	92
Příloha 8 Graf přiblížení listů A. (Sken)	93
Příloha 9 Graf stlačení těsnění D. (Sken)	93
Příloha 10 Graf stlačení těsnění D. (Sken)	94
Příloha 11 Graf stlačení těsnění D. (Sken)	94
Příloha 12 Graf stlačení podložky B. (Sken)	95
Příloha 13 Graf posuvu na hlavě šroubu SH Y. (Sken)	95
Příloha 14 Graf posuvu na volném konci šroubu SD Y = C. (Sken)	96
Příloha 15 Tabulka dat z Aramisu. (3D)	96
Příloha 16 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (3D)	97
Příloha 17 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (3D)	98
Příloha 18 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore), 44 (uprostřed nahore vlevo), 66 (uprostřed nahore vpravo), 80 (uprostřed dole vlevo), 80_110 (uprostřed dole vpravo) a 80_30 (dole)). (3D)	99
Příloha 19 Graf přiblížení přírub A. (3D)	100
Příloha 20 Graf stlačení těsnění D. (3D)	100
Příloha 21 Graf rotace horní příruby HP. (3D)	101
Příloha 22 Graf rotace spodní příruby SP. (3D)	101
Příloha 23 Graf posuvu na hlavě šroubu SHM Y. (3D)	102

Příloha 24 Graf posuvu volného konce šroubu SDM $Y = C$. (Sken)	102
Příloha 25 Graf posuvu na hlavě šroubu M1. (3D)	103
Příloha 26 Graf posuvu na hlavě šroubu M2. (3D)	103
Příloha 27 Graf posuvu na hlavě šroubu M1. (3D)	103
Příloha 28 Graf posuvu volného konce šroubu M1. (3D)	104
Příloha 29 Graf posuvu volného konce šroubu M2. (3D)	104
Příloha 30 Graf posuvu volného konce šroubu M3. (3D)	104
Příloha 31 Tabulka dat z Correlate. (2D).....	105
Příloha 32 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (2D)	106
Příloha 33 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (2D)	107
Příloha 34 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore), 44 (uprostřed nahore vlevo), 66 (uprostřed nahore vpravo), 80 (uprostřed dole vlevo), 80_110 (uprostřed dole vpravo) a 80_30 (dole)). (2D).....	108
Příloha 35 Graf přiblížení přírub A. (2D)	109
Příloha 36 Graf stlačení těsnění D. (2D)	109
Příloha 37 Graf rotace horní příruby HP. (2D).....	110
Příloha 38 Graf rotace spodní příruby SP. (2D)	110
Příloha 39 Porovnávací výpočet.....	111

12.1 Externí přílohy

Příloha 1: Skript pro zobrazení 3D grafů

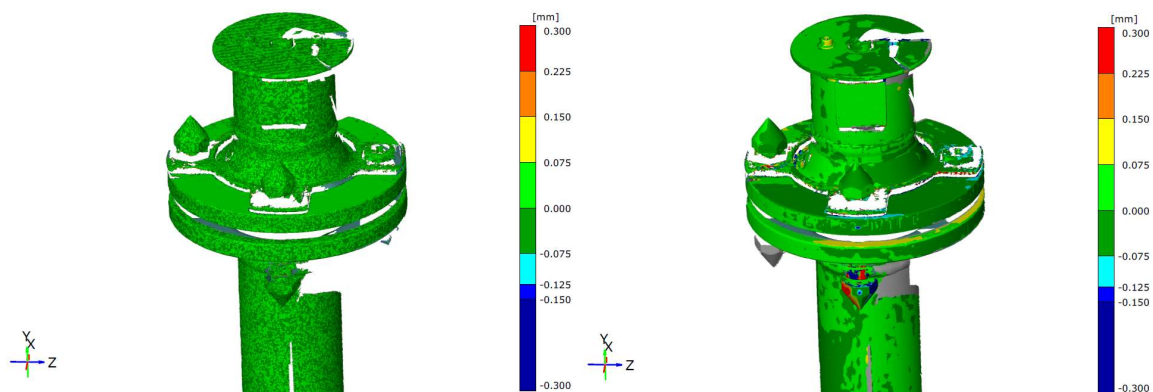
Příloha 2: Publikační výsledek

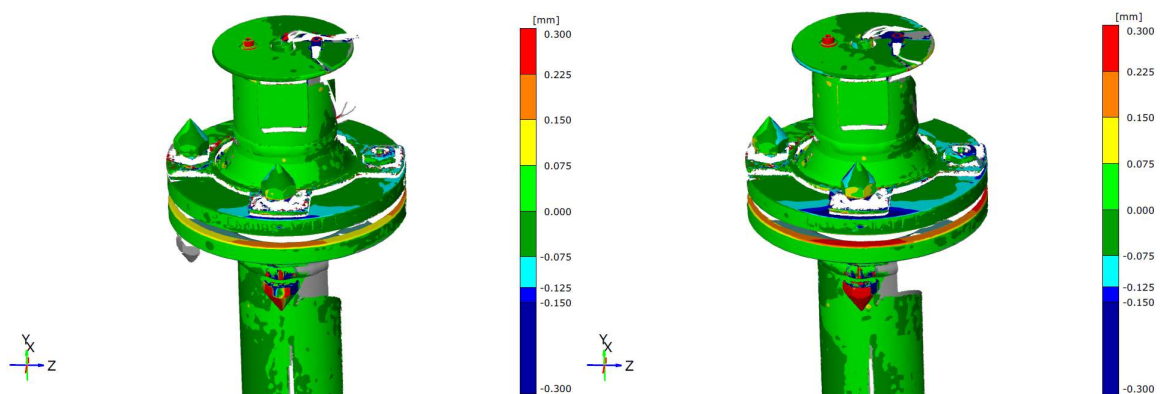
Vyhodnocení Sken

Příloha 1 Tabulka dat z Inspektu. (Sken)

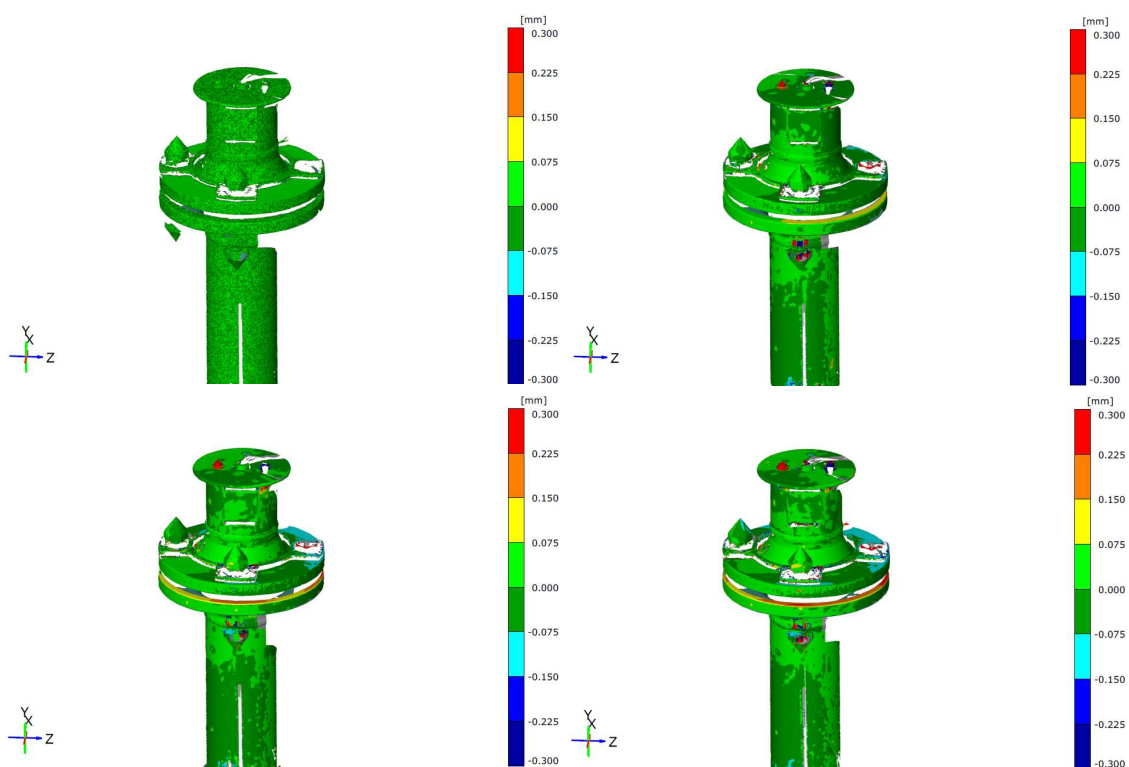
		A	B	C=SD Y	D	SH Y
	44	-0,185	-0,199	-0,145	-0,069	0
M1	66	-0,367	-0,226	-0,21	-0,109	0,010
	80	-0,562	-0,346	-0,35	-0,148	0,013
	44	-0,146	-0,135	-0,96	-0,029	-0,071
M2	66	-0,295	-0,171	-0,213	-0,060	-0,119
	80	-0,381	-0,300	-0,277	-0,072	-0,146
	44	-0,119	-0,016	-0,09	-0,062	-0,059
	66	-0,315	-0,259	-0,308	-0,105	-0,192
M3	80	-0,403	-0,357	-0,321	-0,098	-0,197
	80_110	-0,369	-0,34	-0,404	-0,064	-0,171
	80_30	-0,363	-0,298	-0,332	-0,258	-0,248

Příloha 2 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)). (Sken)

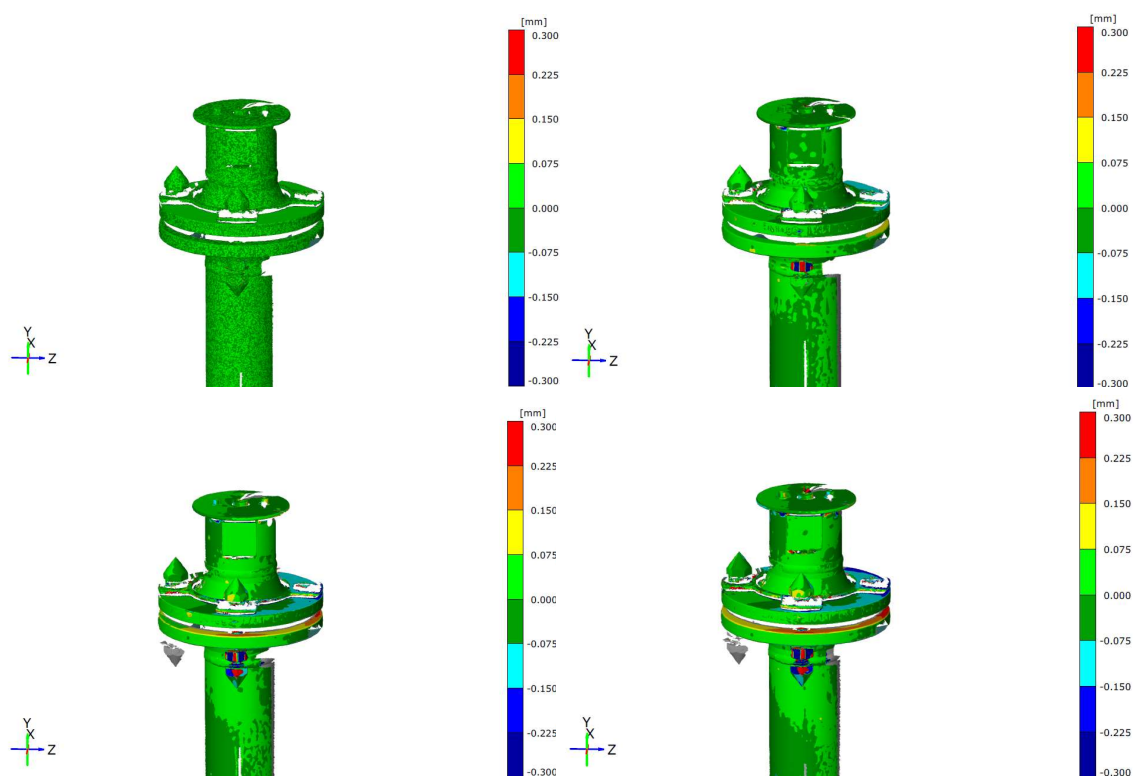




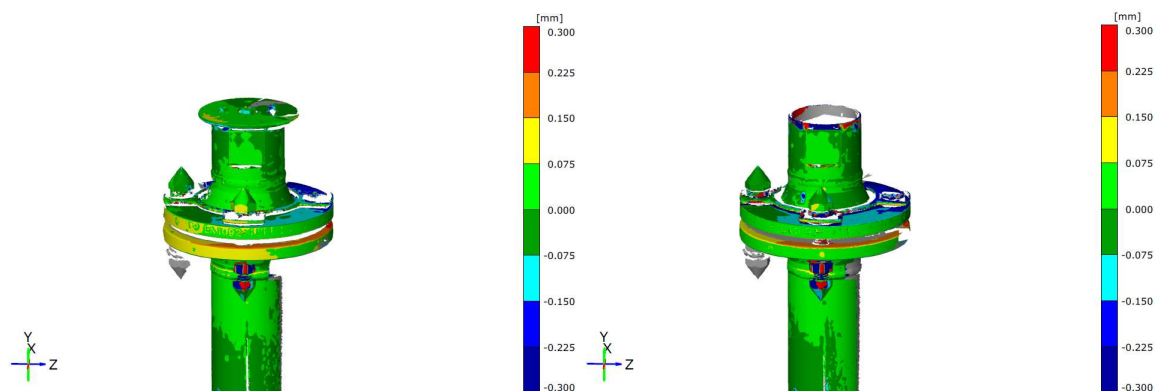
Příloha 3 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)).
(Sken)

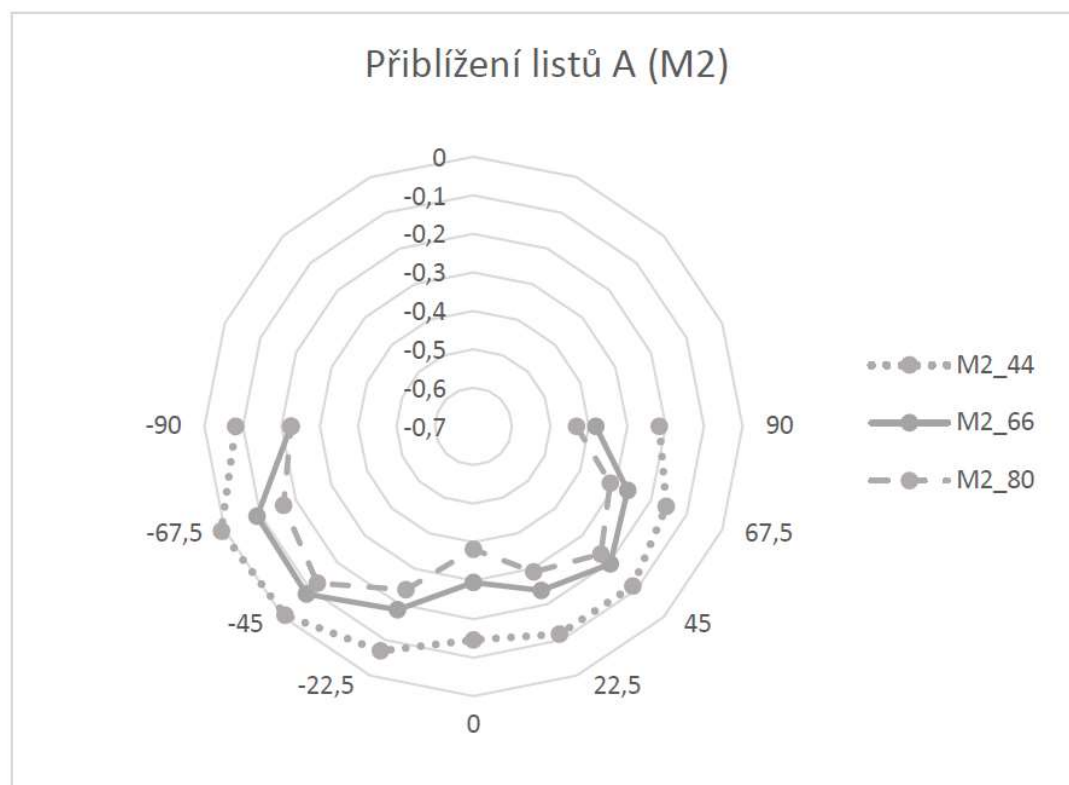
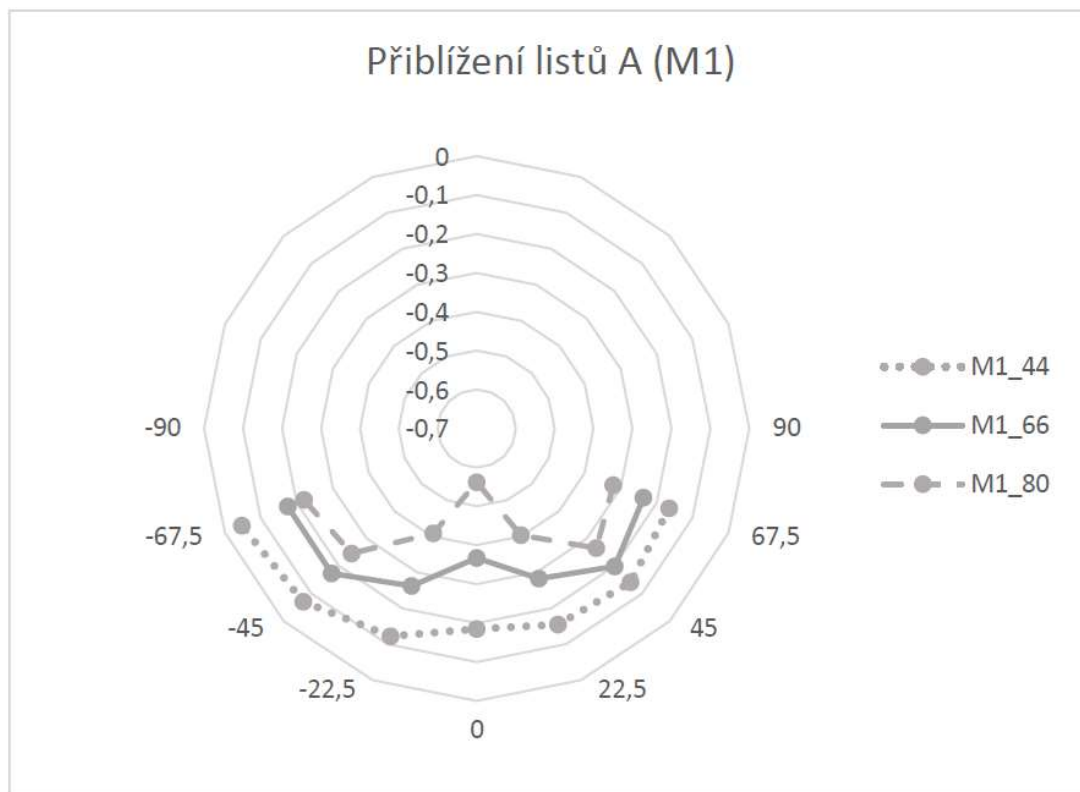


Příloha 4 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore vlevo), 44 (nahore vpravo), 66 (dole vlevo) a 80 (dole vpravo)). (Sken)

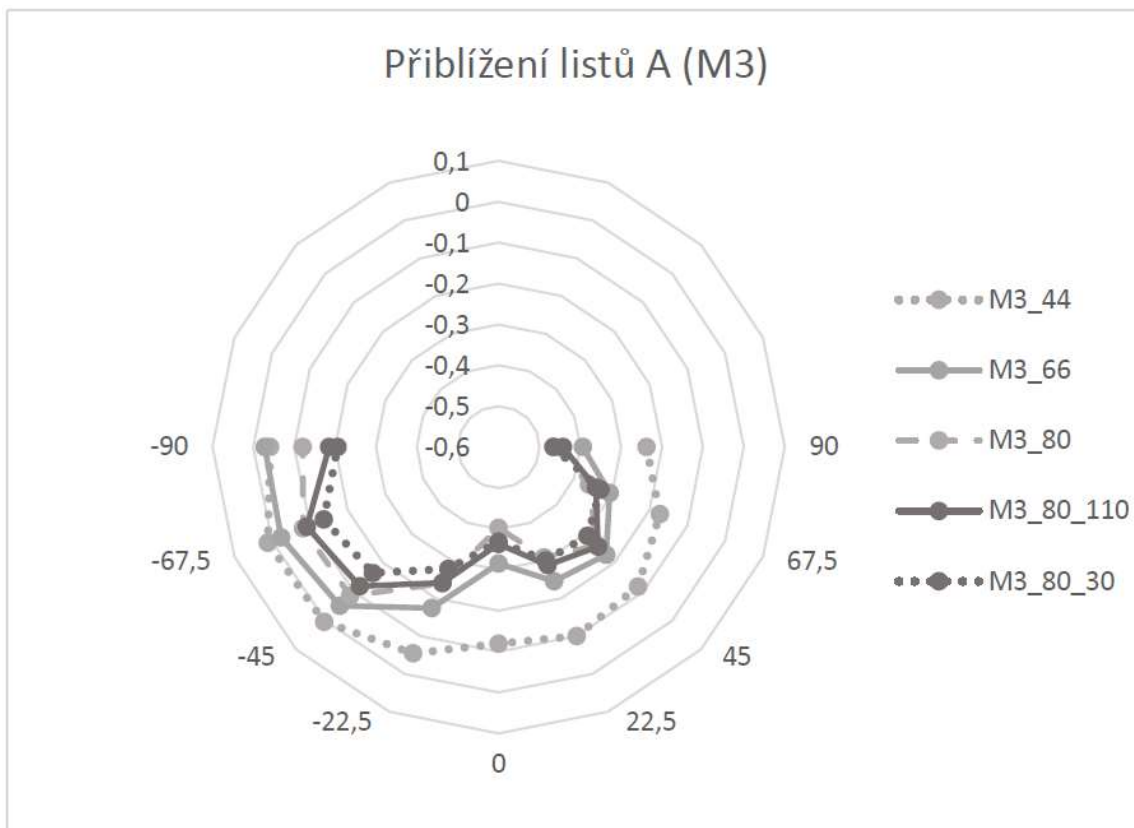


Příloha 5 Barevná mapa pro M2. (80_110 (vlevo), 80_30 (vpravo)). (Sken)

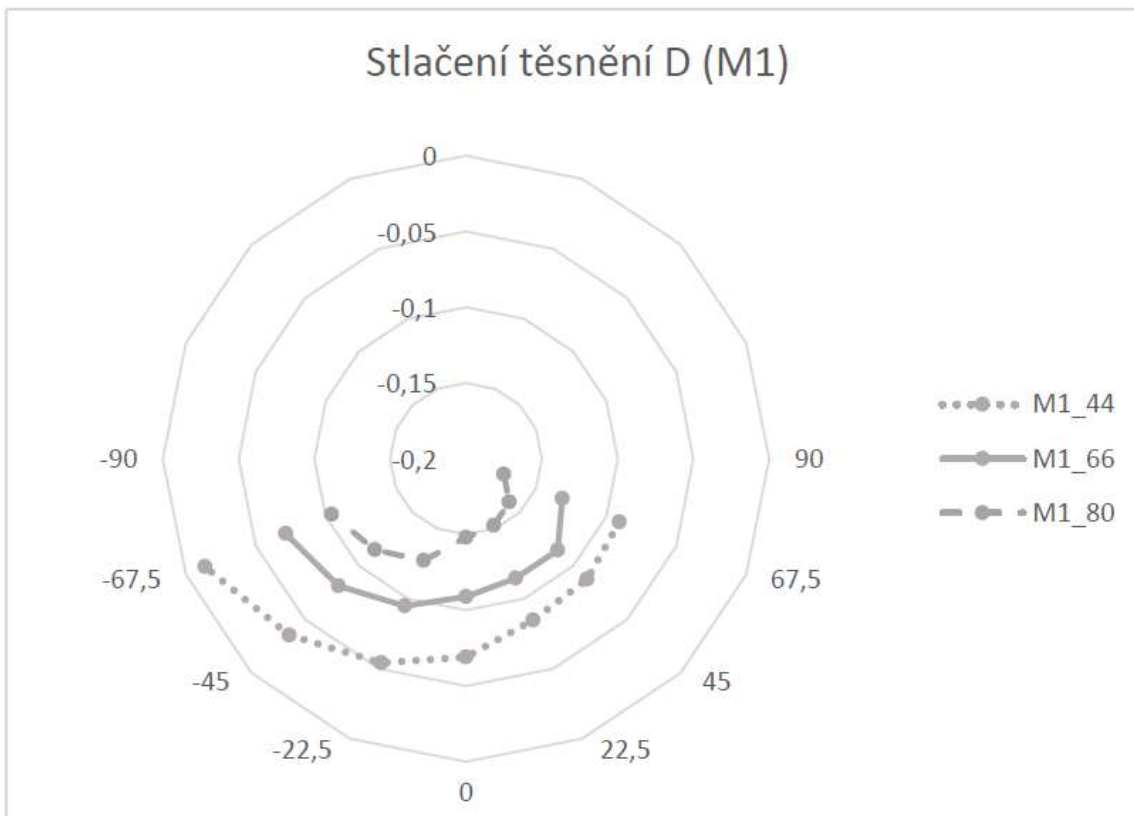




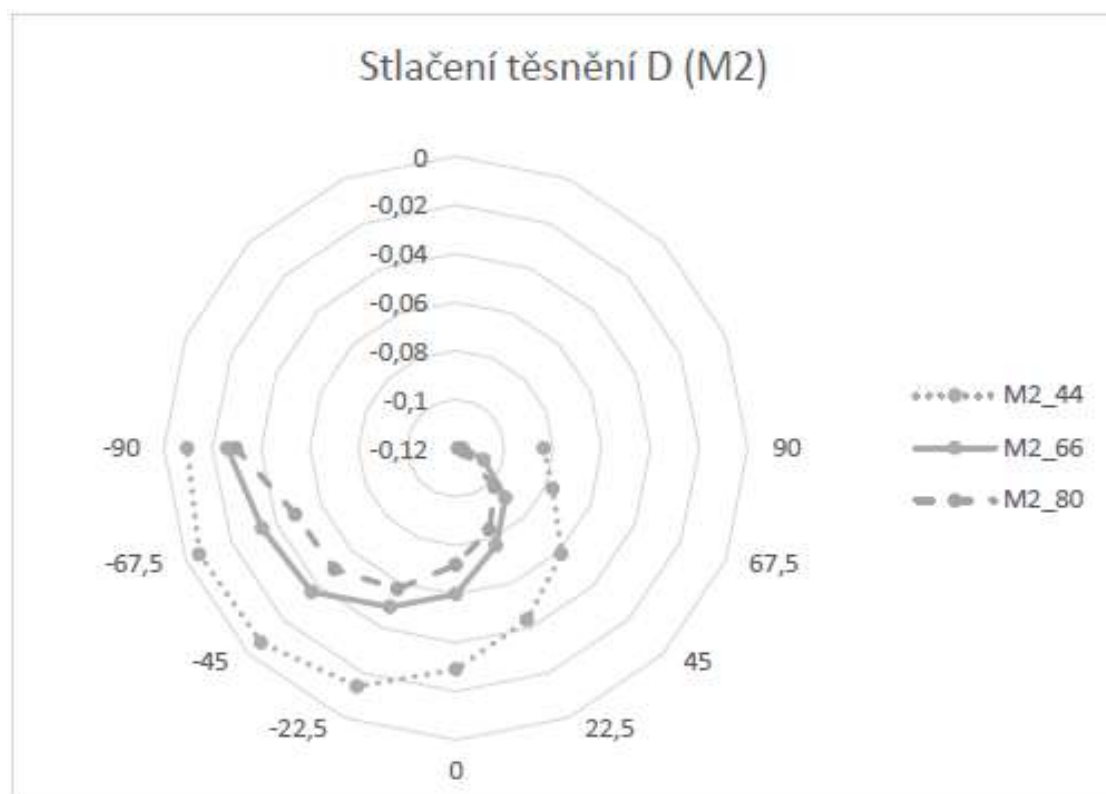
Příloha 8 Graf přiblížení listů A. (Sken)



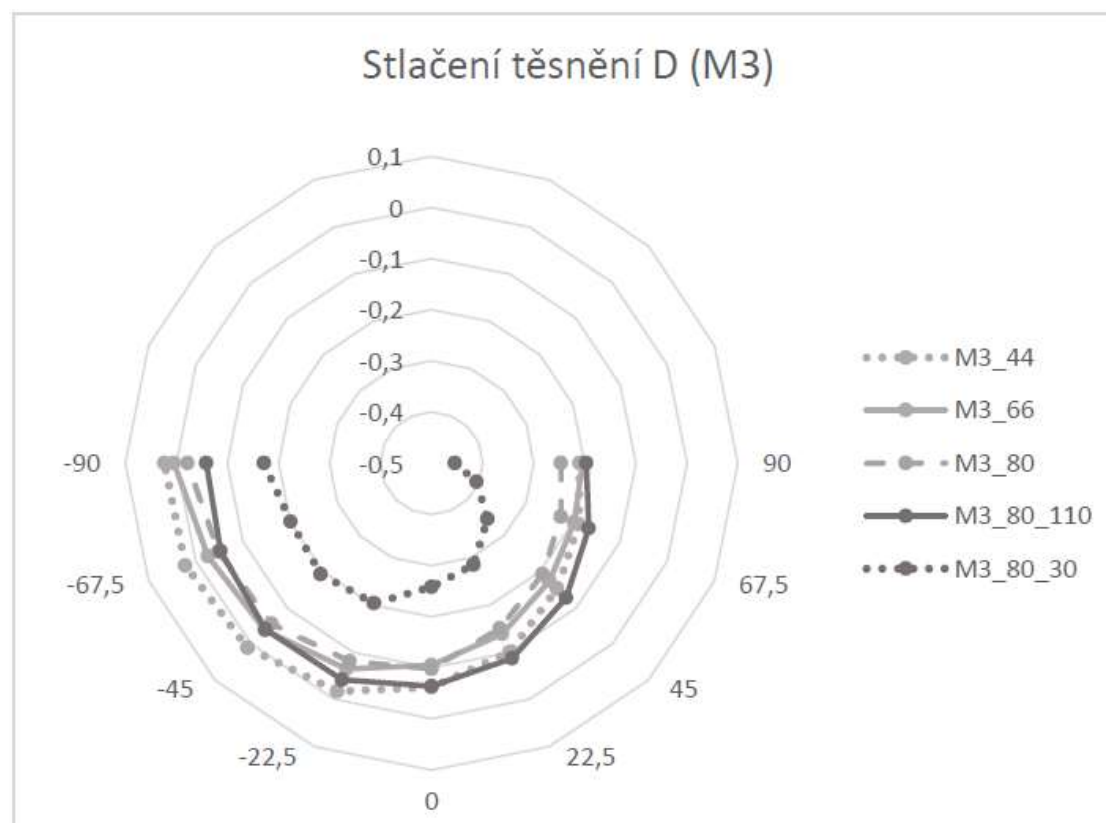
Příloha 9 Graf stlačení těsnění D. (Sken)



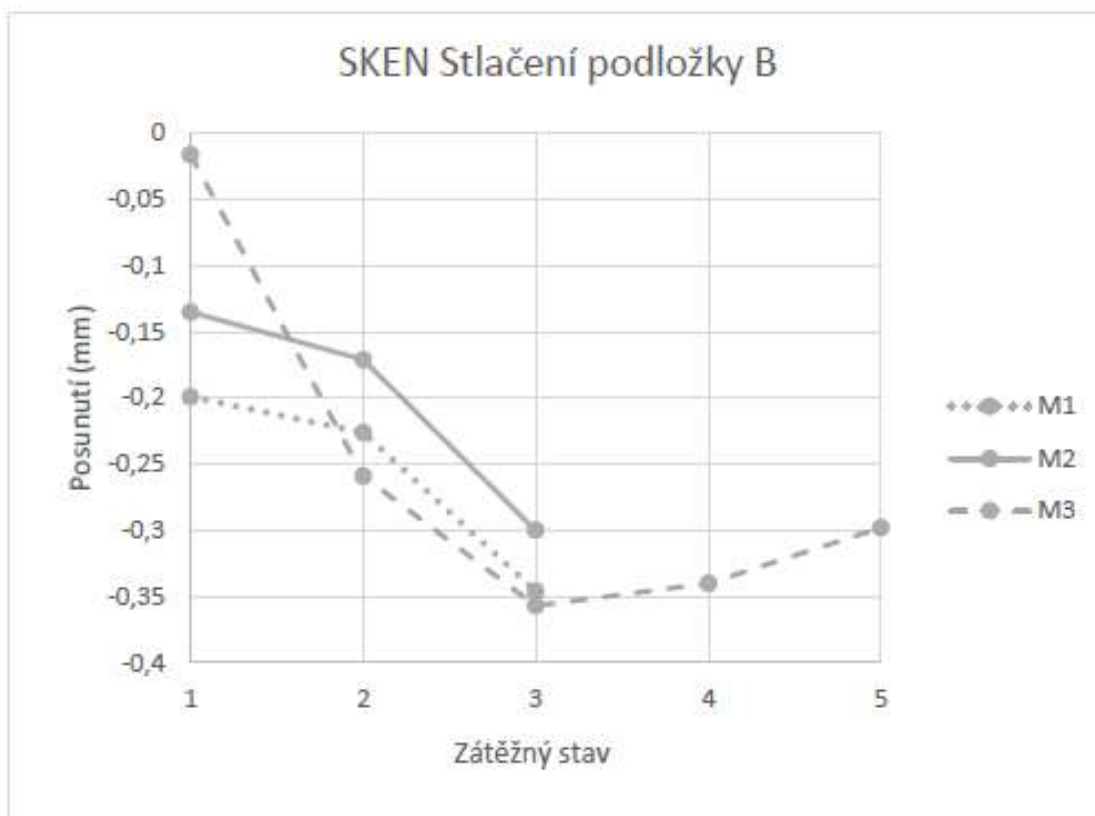
Příloha 10 Graf stlačení těsnění D. (Sken)



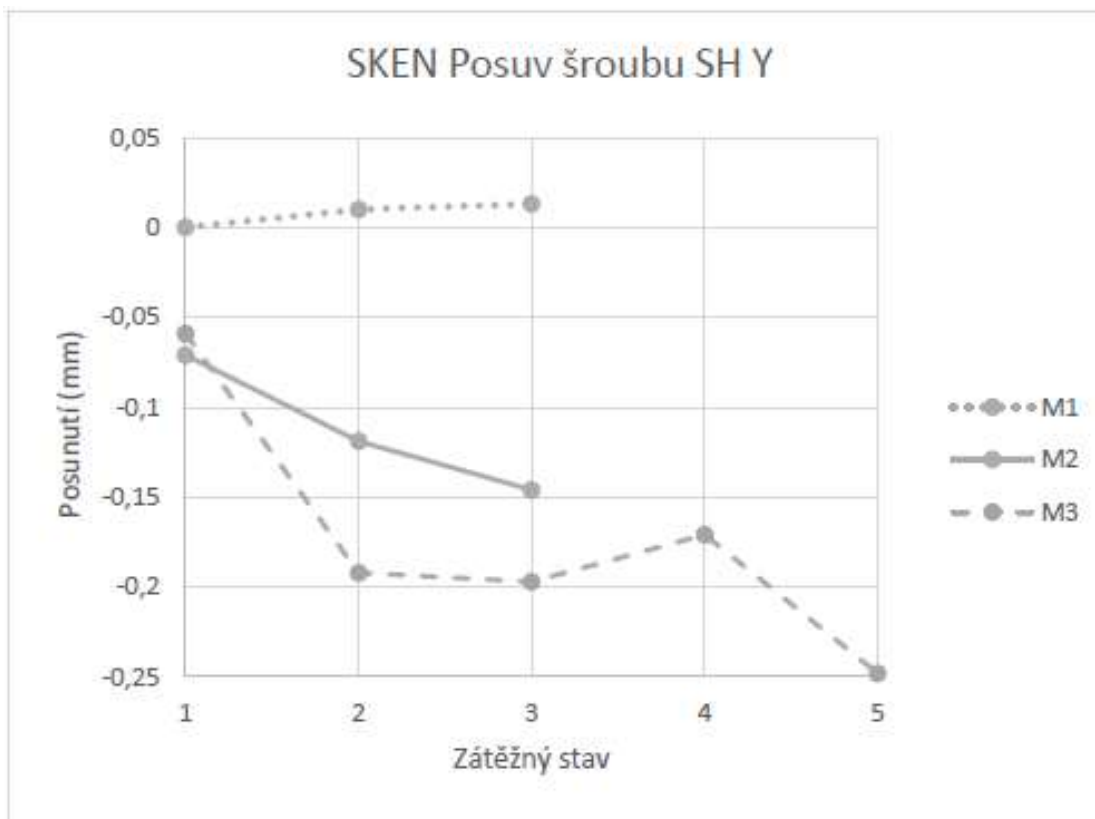
Příloha 11 Graf stlačení těsnění D. (Sken)

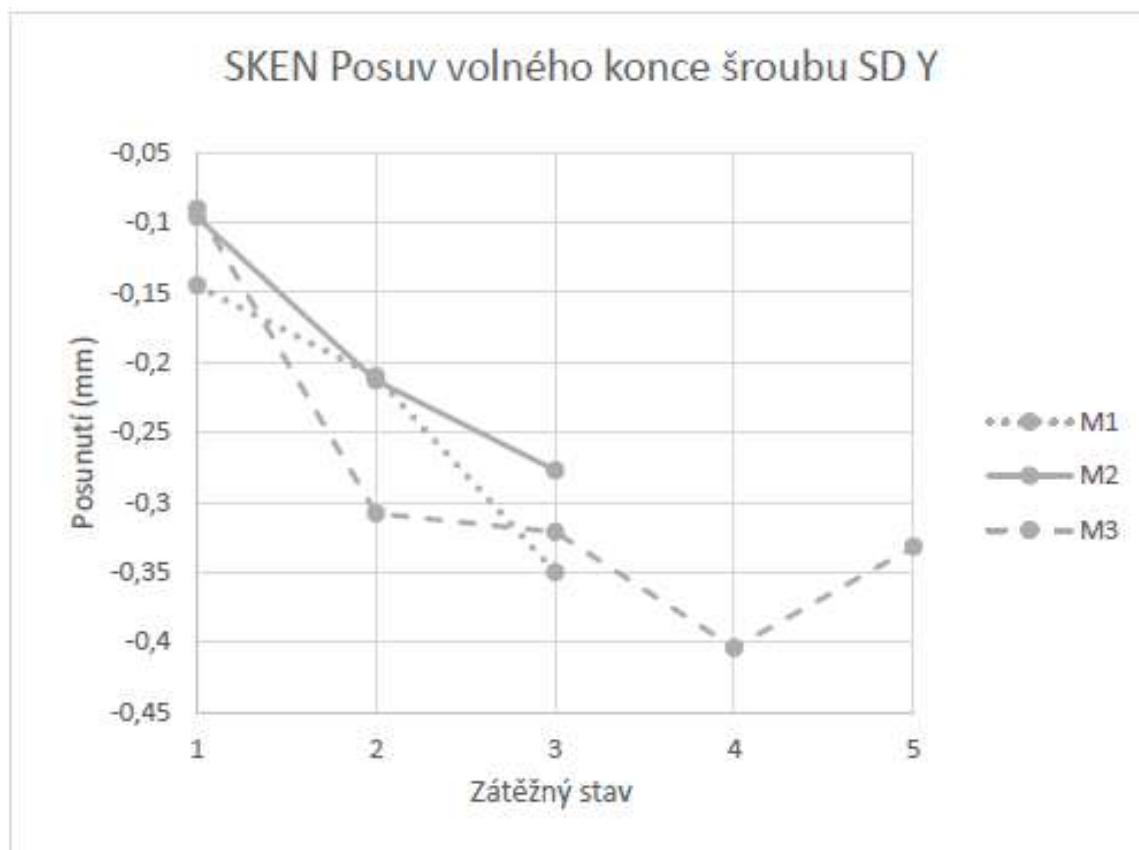


Příloha 12 Graf stlačení podložky B. (Sken)



Příloha 13 Graf posuvu na hlavě šroubu SH Y. (Sken)



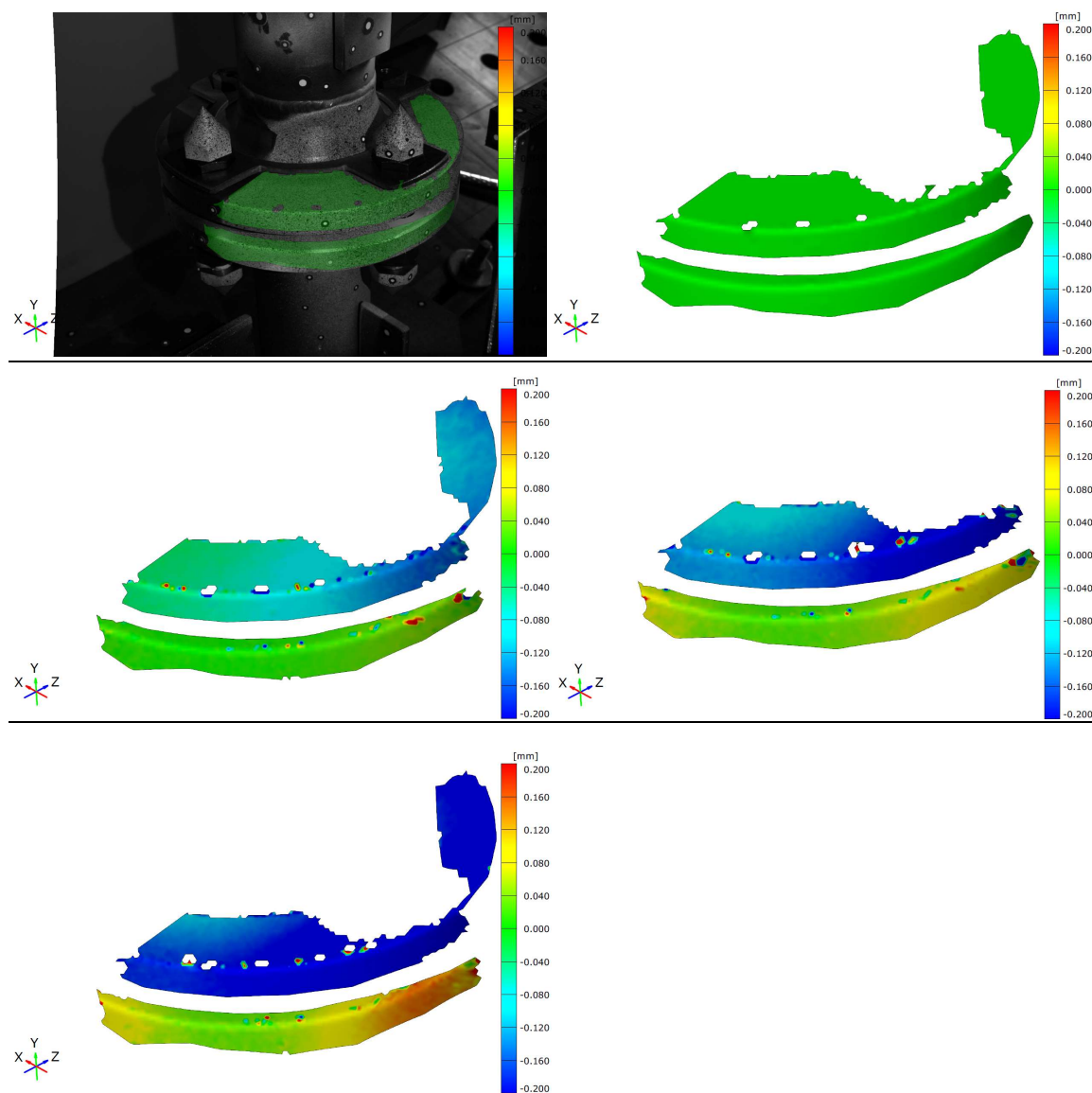


Vyhodnocení 3D

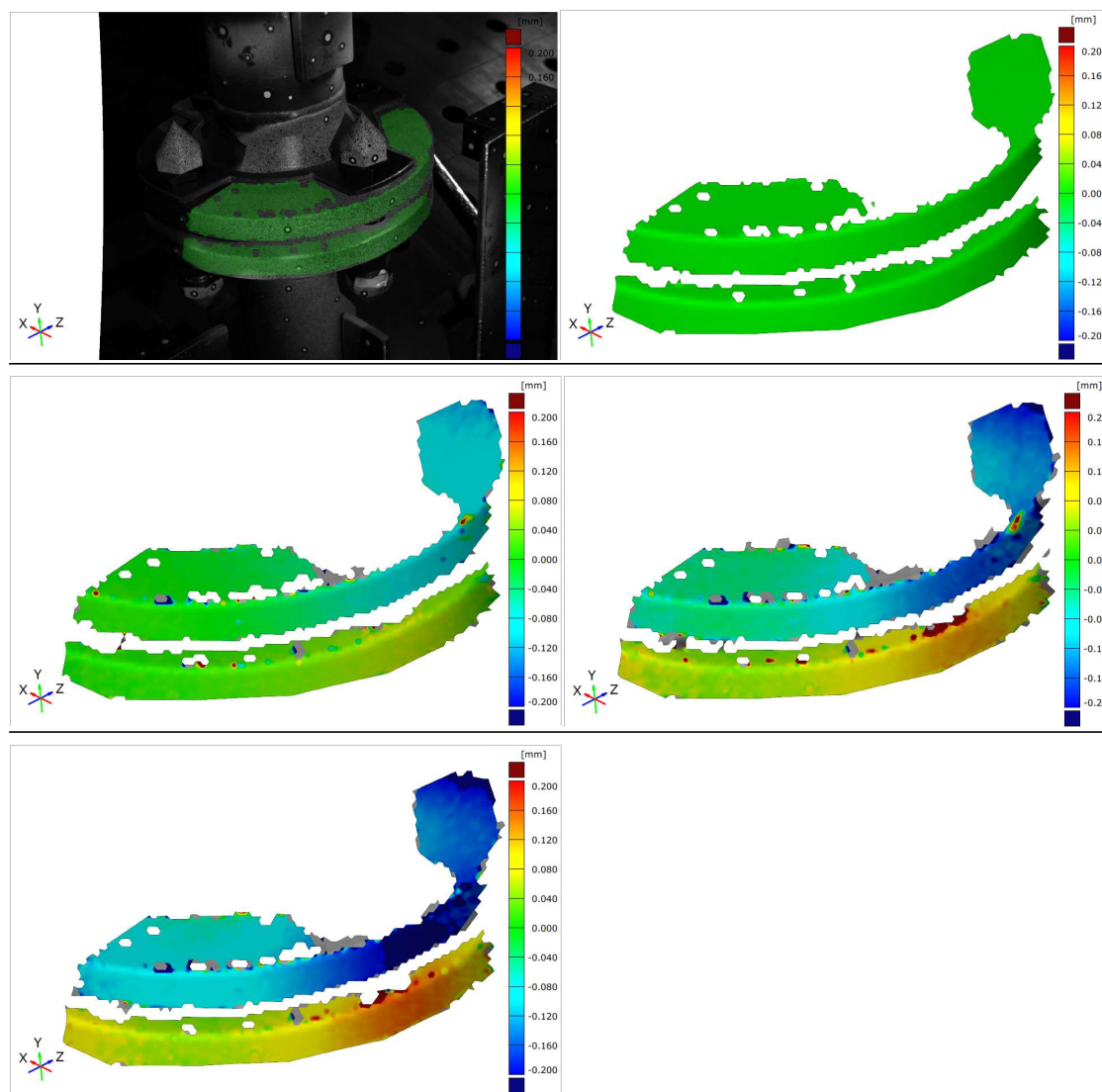
Příloha 15 Tabulka dat z Aramis. (3D)

	A	D	SHMX	SHMY	SHMZ	SDMX	SDM Y=C	SDMZ	PH	SP
44	-0,193	-0,074	-0,005	0,004	0,076	0,006	-0,014	-0,226	0,03	0
M1 66	-0,378	-0,108	-0,094	0,008	0,141	-0,126	-0,246	-1,049	0,05	0
80	-0,578	-0,137	-0,151	0,010	0,233	-0,528	-0,31	-0,923	0,07	0,01
44	-0,141	-0,046	0,015	-0,080	0,032	-0,025	-0,097	0,064	0,03	0
M2 66	-0,290	-0,068	0,003	-0,163	0,038	-0,027	-0,197	0,077	0,03	0,01
80	-0,370	-0,086	0,008	-0,214	0,050	-0,004	-0,254	0,085	0,04	0,01
44	-0,117	-0,046	-0,017	-0,078	0,068	-0,025	-0,082	0,033	0,02	0
66	-0,314	-0,086	-0,063	-0,198	0,105	0,157	-0,259	0,173	0,03	0
M3 80	-0,398	-0,089	-0,083	-0,243	0,116	0,234	-0,336	0,217	0,04	0
80_110	-0,366	-0,058	-0,117	-0,197	0,118	0,304	-0,333	-0,041	0,05	0
80_30	-0,381	-0,220	-0,024	-0,301	0,121	0,373	-0,377	-0,062	0,05	0

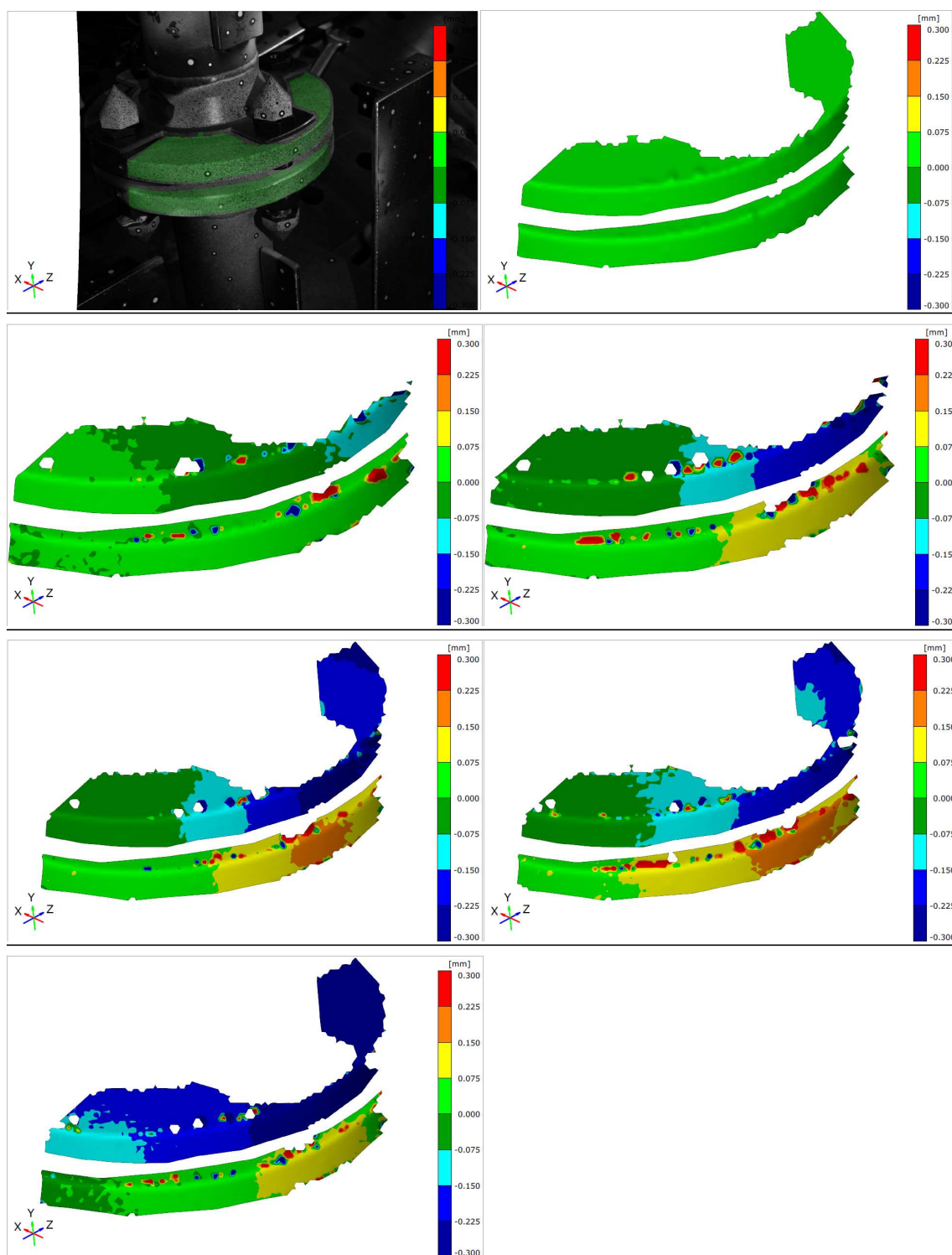
Příloha 16 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (3D)



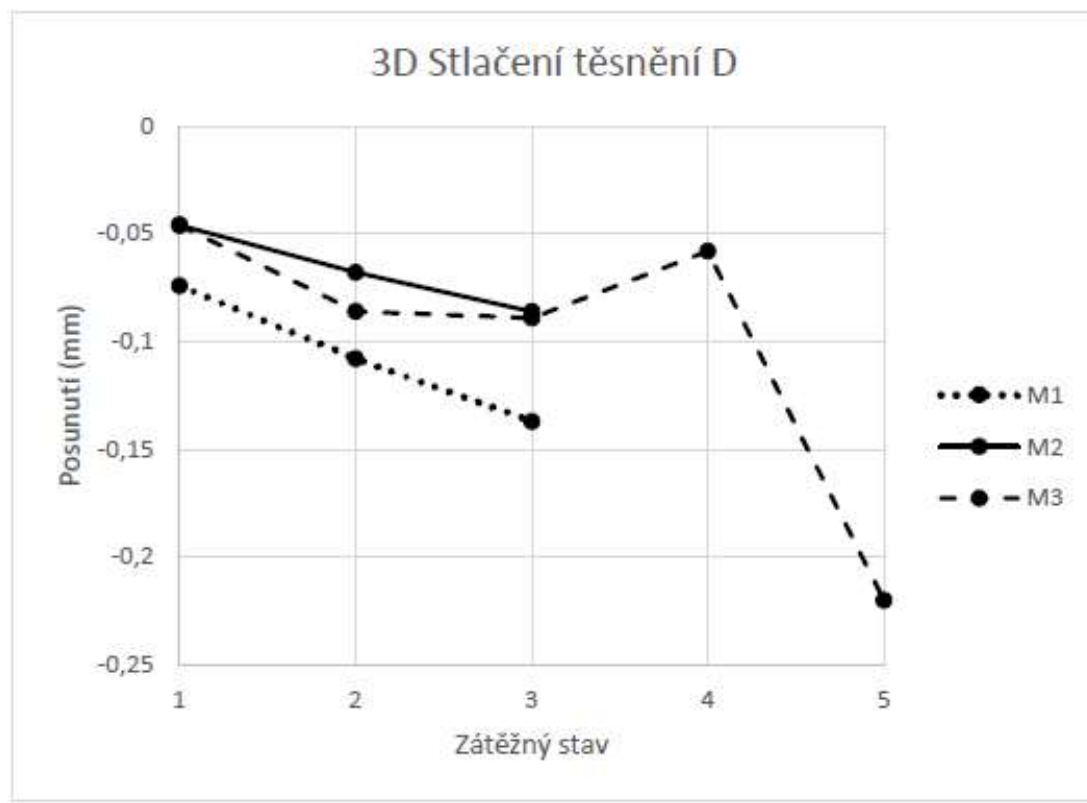
Příloha 17 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (3D)



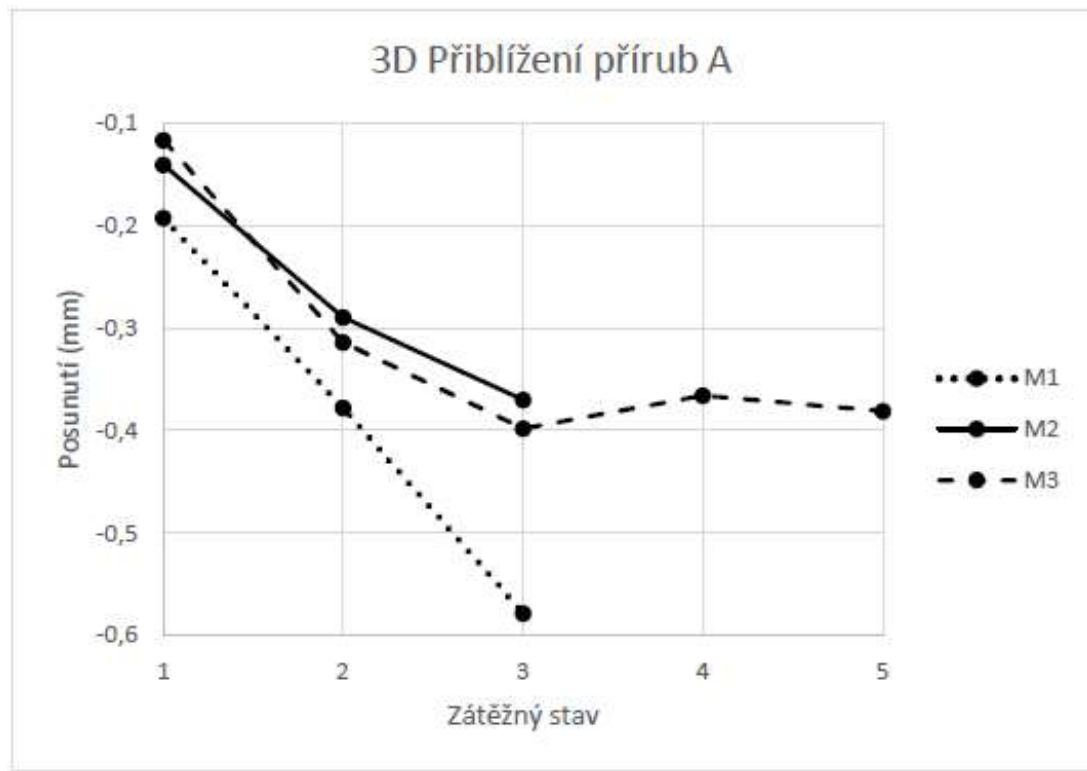
Příloha 18 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore), 44 (uprostřed nahore vlevo), 66 (uprostřed nahore vpravo), 80 (uprostřed dole vlevo), 80_110 (uprostřed dole vpravo) a 80_30 (dole)). (3D)



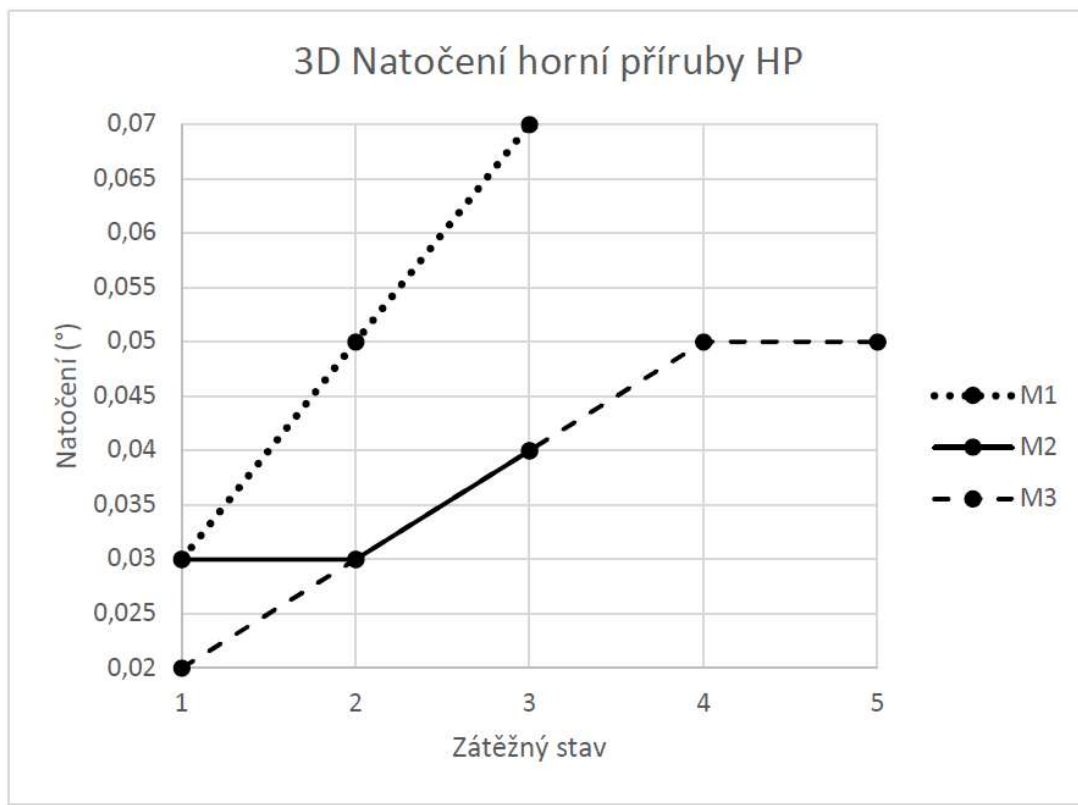
Příloha 19 Graf přiblížení přírub A. (3D)



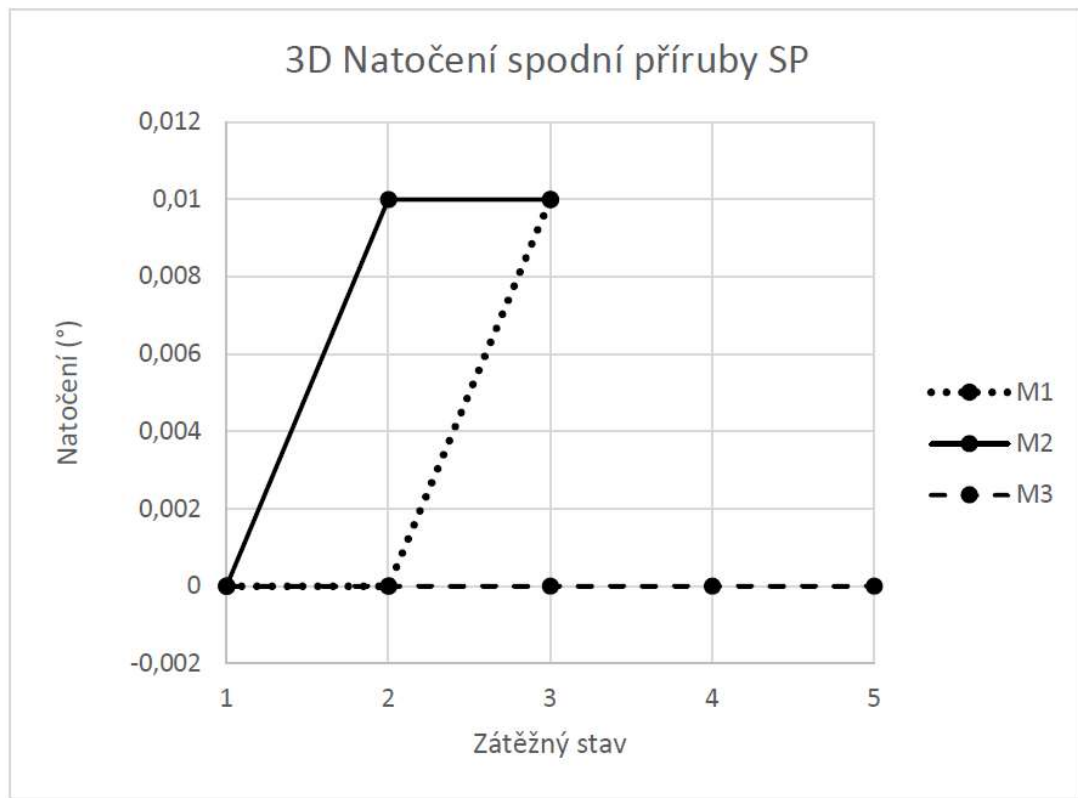
Příloha 20 Graf stlačení těsnění D. (3D)



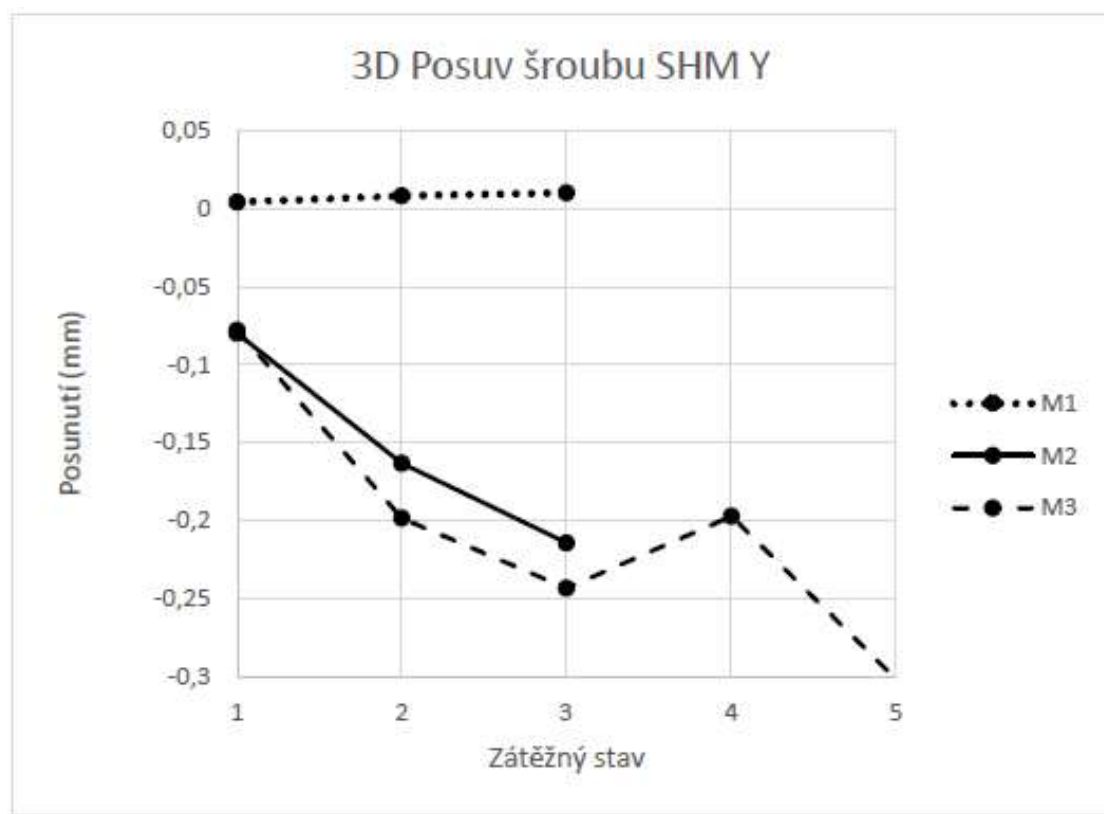
Příloha 21 Graf rotace horní příruby HP. (3D)



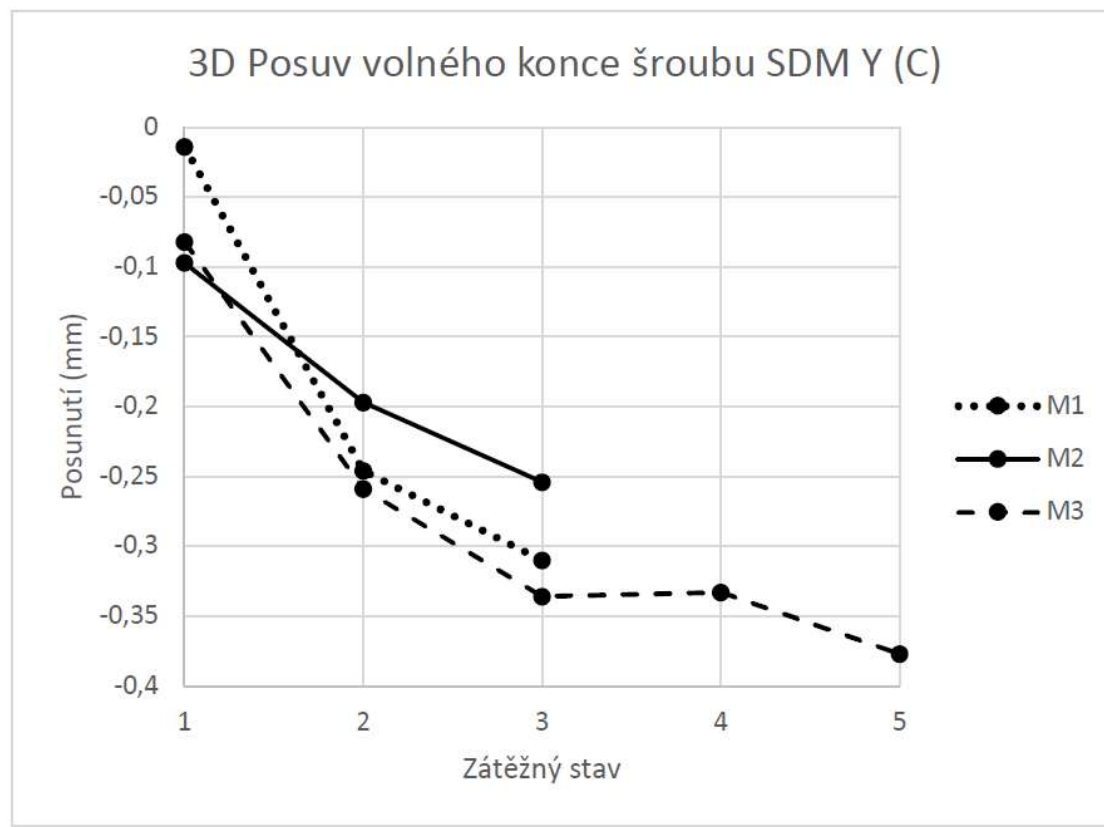
Příloha 22 Graf rotace spodní příruby SP. (3D)



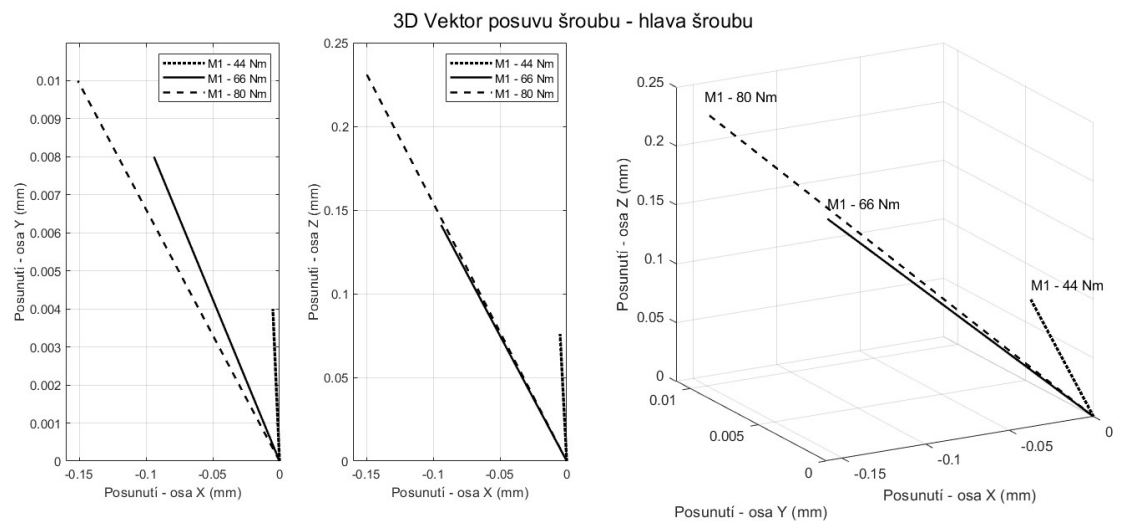
Příloha 23 Graf posuvu na hlavě šroubu SHM Y. (3D)



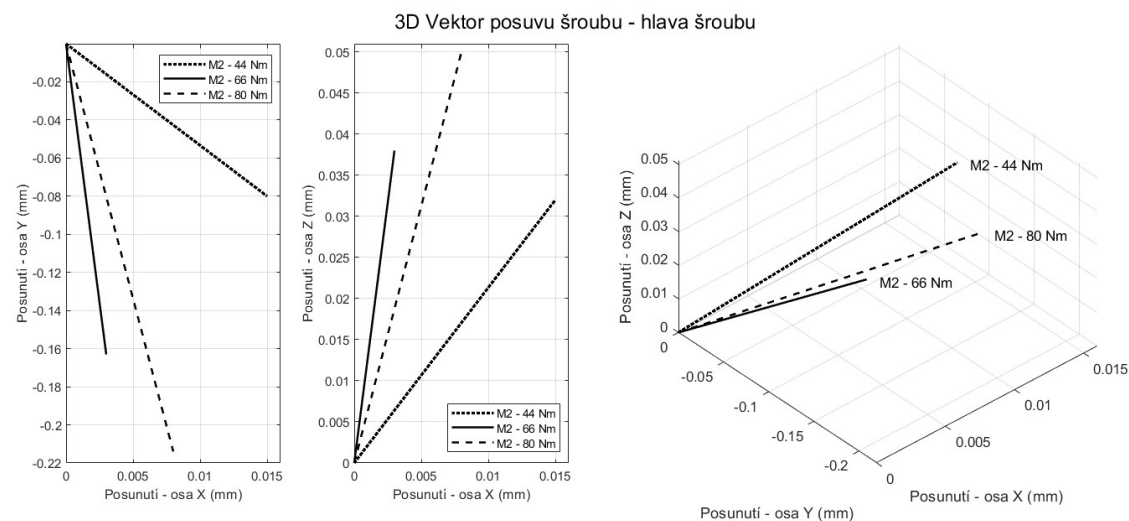
Příloha 24 Graf posuvu volného konce šroubu SDM Y = C. (Sken)



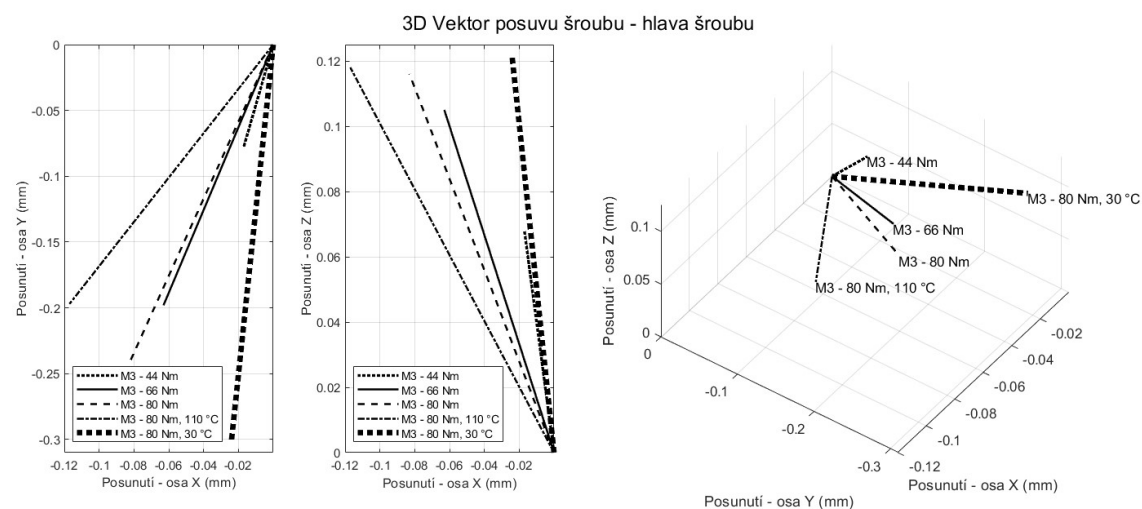
Příloha 25 Graf posuvu na hlavě šroubu M1. (3D)



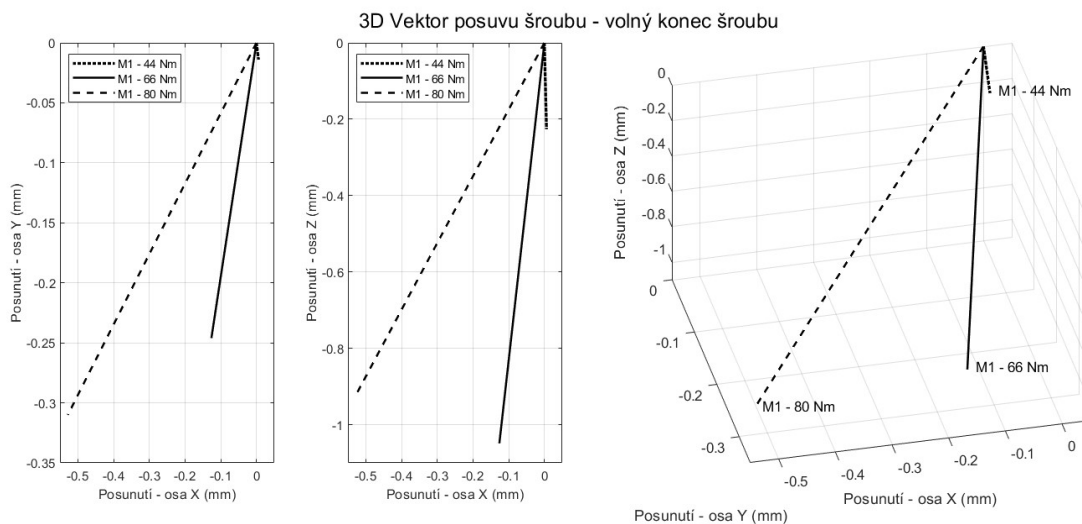
Příloha 26 Graf posuvu na hlavě šroubu M2. (3D)



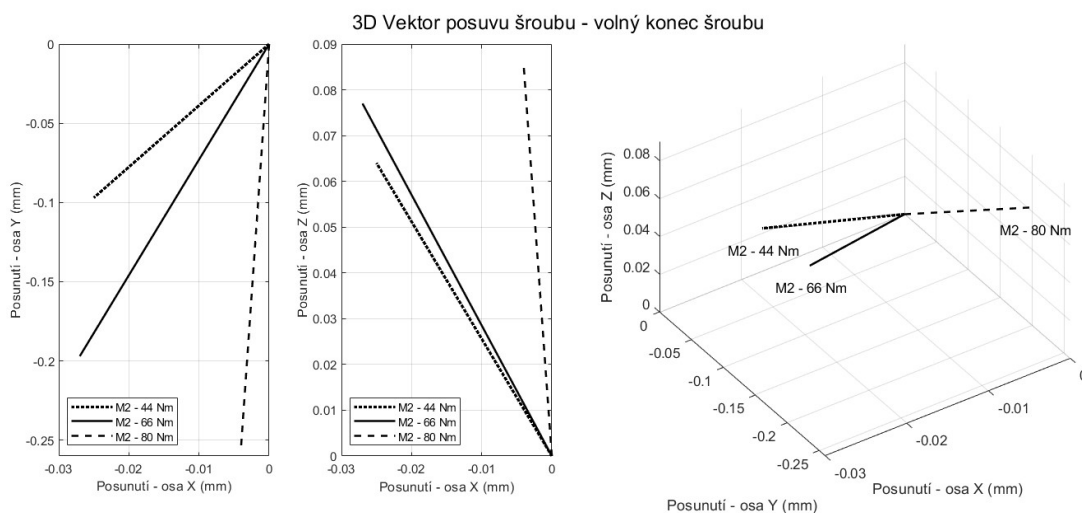
Příloha 27 Graf posuvu na hlavě šroubu M1. (3D)



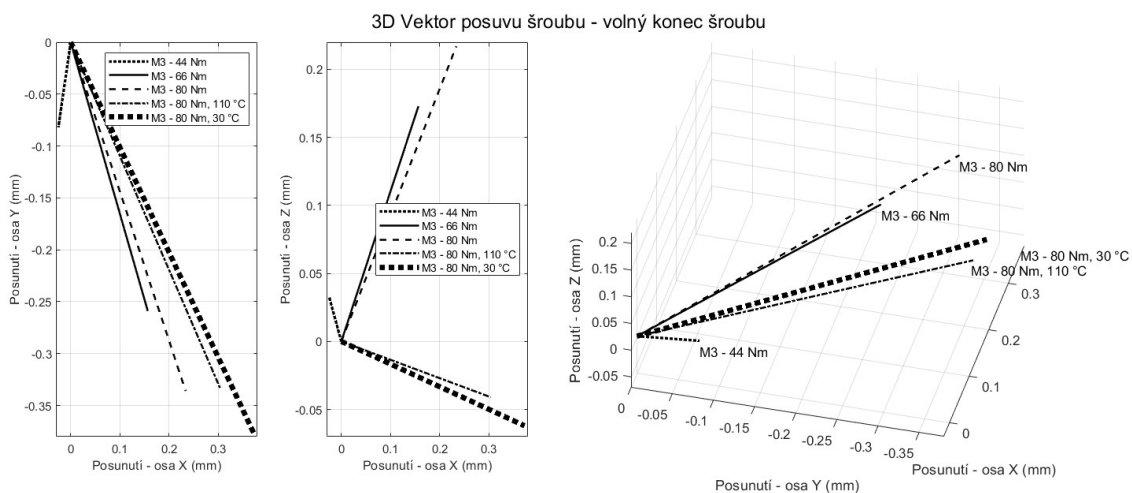
Příloha 28 Graf posuvu volného konce šroubu M1. (3D)



Příloha 29 Graf posuvu volného konce šroubu M2. (3D)



Příloha 30 Graf posuvu volného konce šroubu M3. (3D)

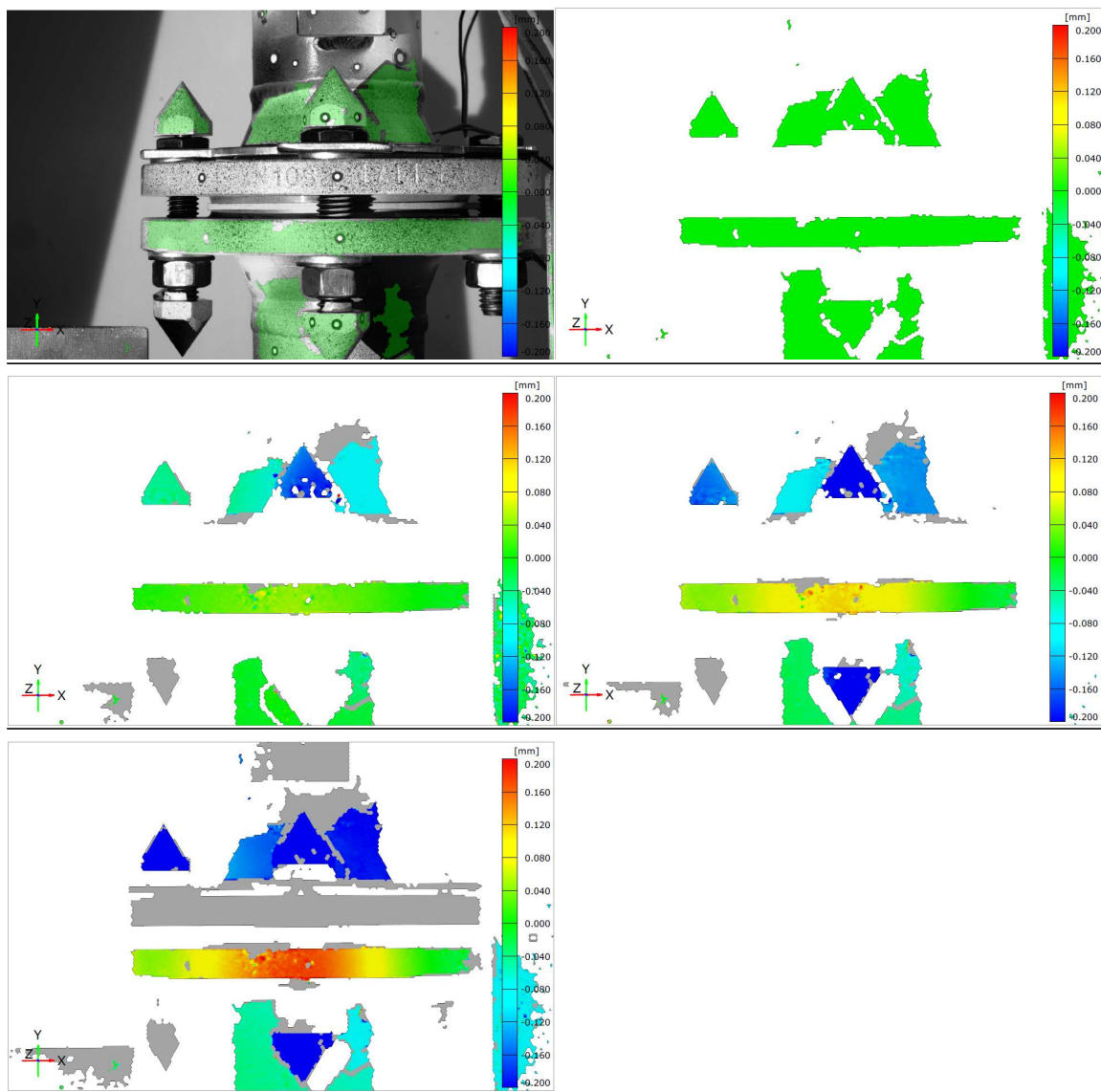


Vyhodnocení 2D

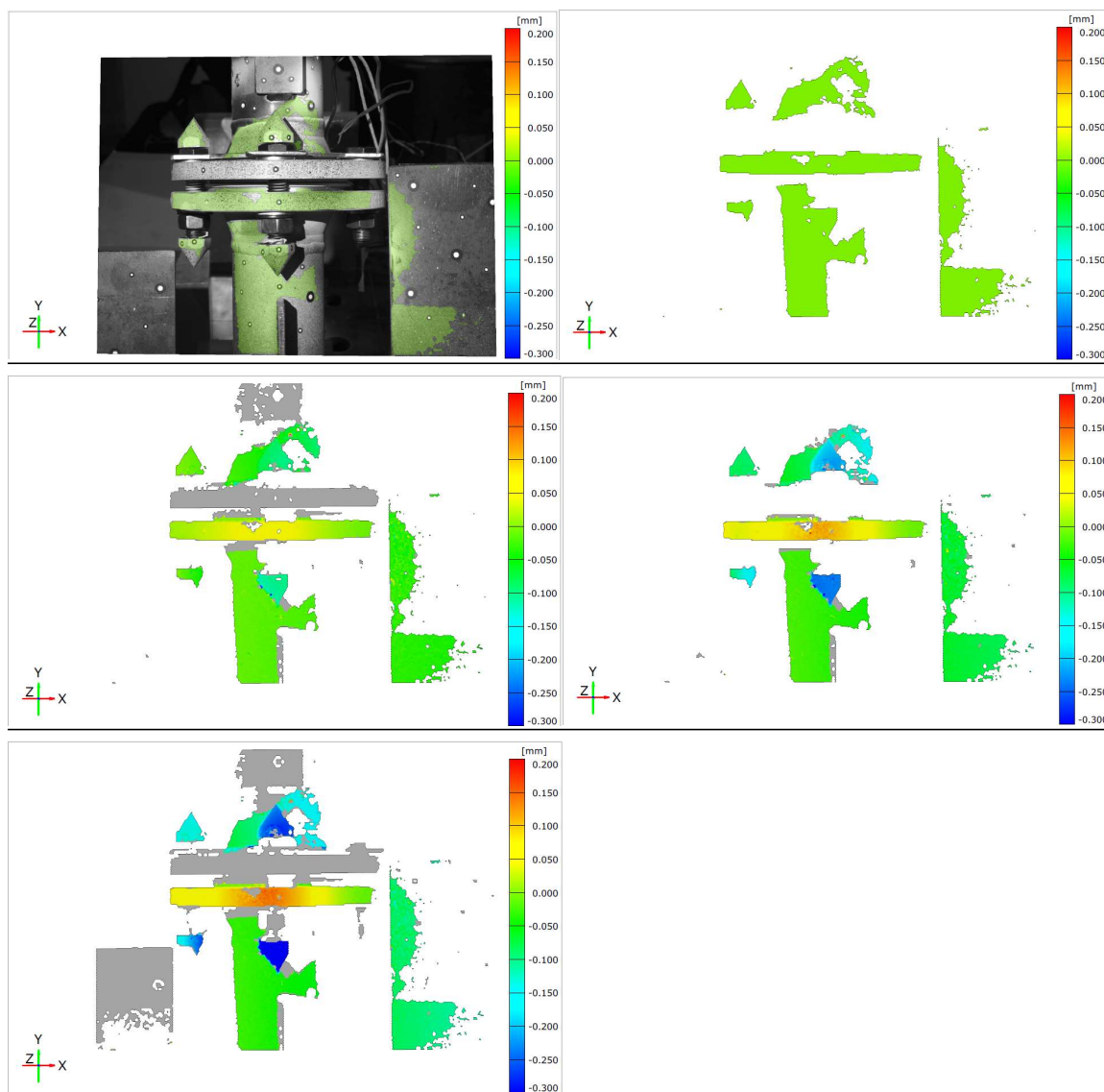
Příloha 31 Tabulka dat z Correlate. (2D)

		A	D	HP	SP
	44	-0,200	-0,072	0,04	0,01
M1	66	-0,384	-0,096	0,08	0,02
	80	-0,593	-0,142	0,11	0,04
	44	-0,138	-0,048	0,04	0,01
M2	66	-0,297	-0,081	0,07	0,02
	80	-0,372	-0,093	0,09	0,03
	44	-0,116	-0,053	0,04	0,01
	66	-0,322	-0,082	0,07	0,02
M3	80	-0,405	-0,089	0,08	0,02
	80_110	-0,392	-0,098	0,07	0
	80_30	-0,405	-0,249	0,06	-0,2

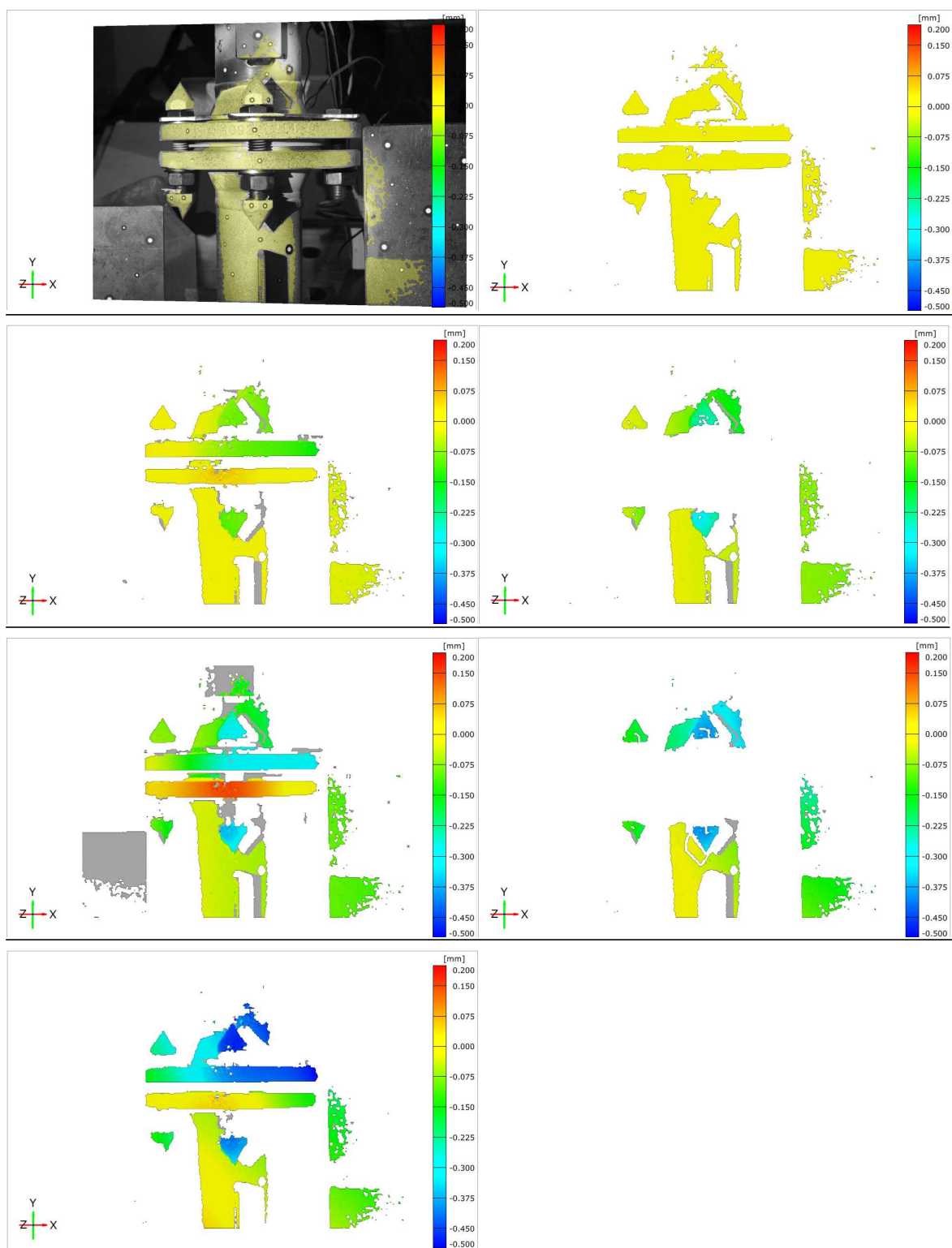
Příloha 32 Barevná mapa pro M1. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (2D)



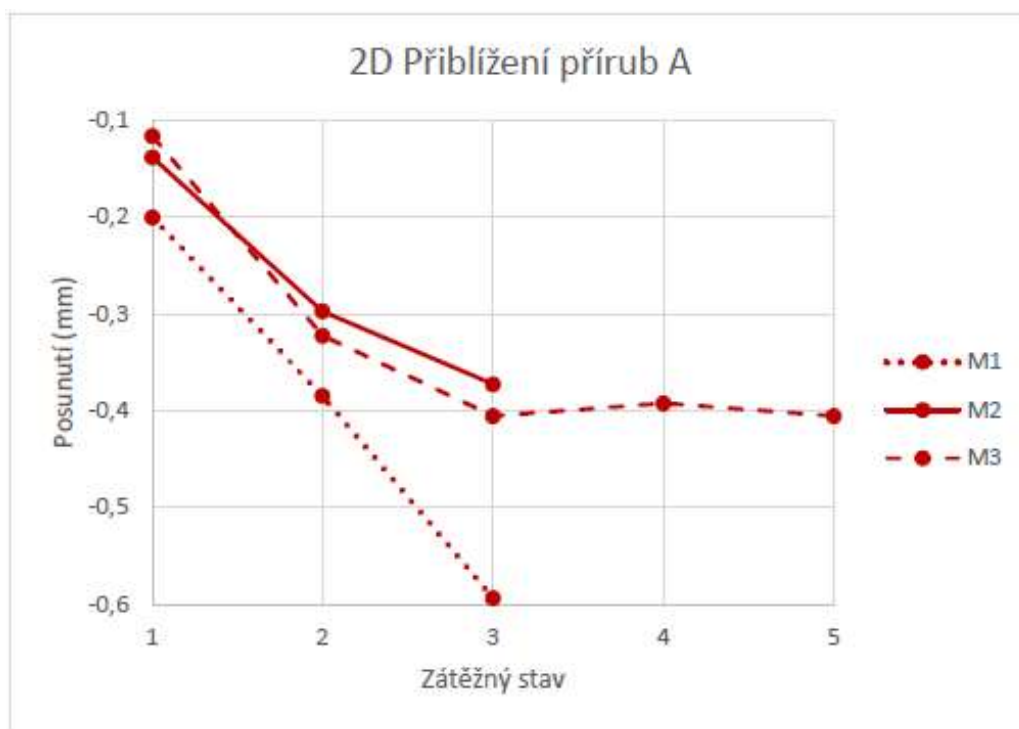
Příloha 33 Barevná mapa pro M2. (25 (nahore), 44 (uprostřed vlevo), 66 (uprostřed vpravo) a 80 (dole)). (2D)



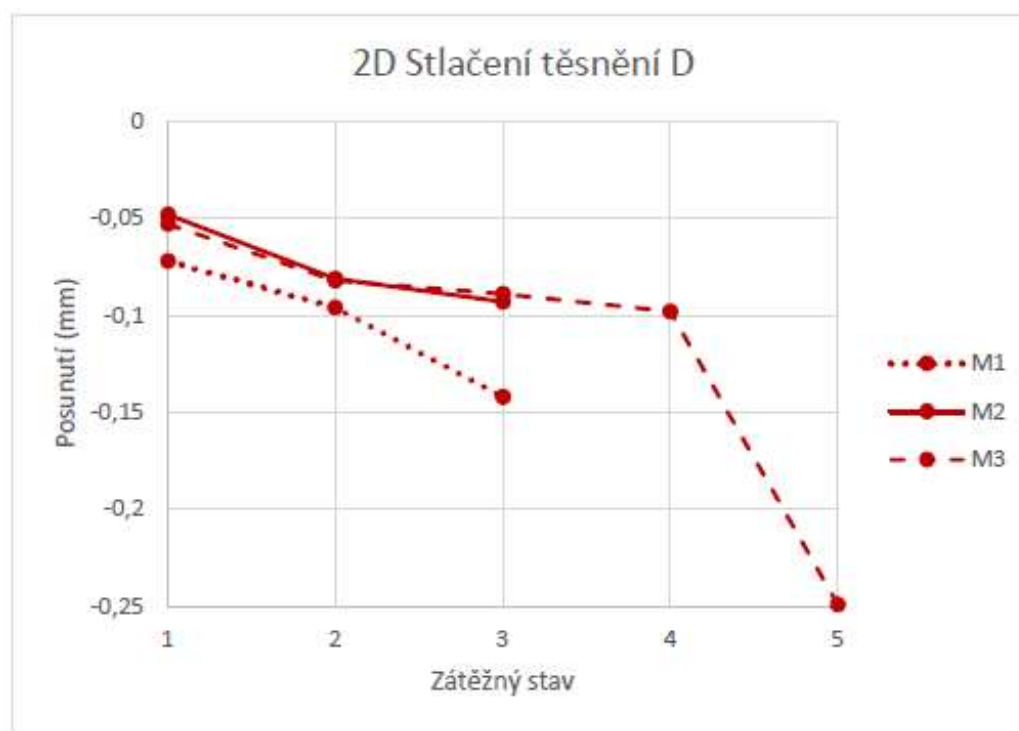
Příloha 34 Barevná mapa pro M3. (25 (nahore), 44 (uprostřed nahore vlevo), 66 (uprostřed nahore vpravo), 80 (uprostřed dole vlevo), 80_110 (uprostřed dole vpravo) a 80_30 (dole)). (2D)



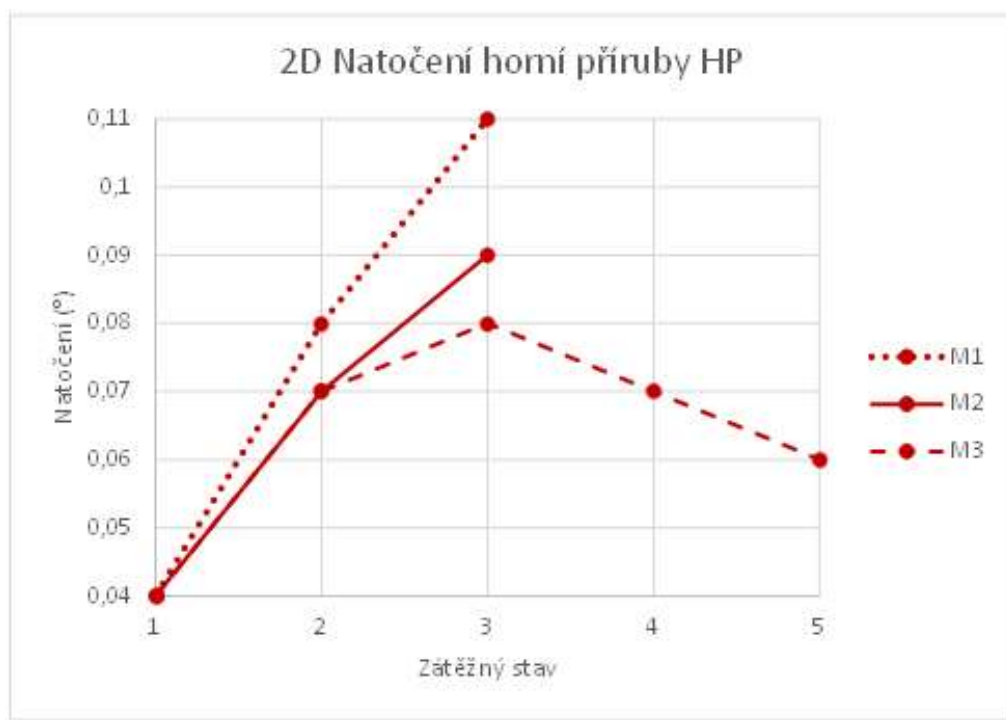
Příloha 35 Graf přiblížení přírub A. (2D)



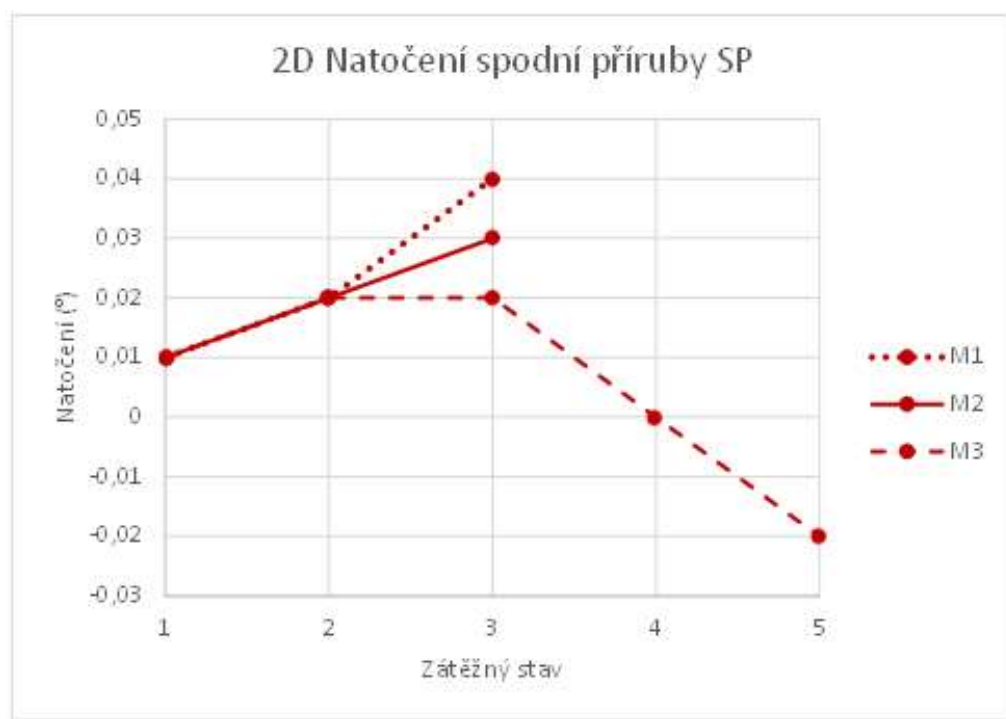
Příloha 36 Graf stlačení těsnění D. (2D)



Příloha 37 Graf rotace horní příruby HP. (2D)



Příloha 38 Graf rotace spodní příruby SP. (2D)



FŠI VUT Brno
Energetický ústav
Odbor energetické inženýrství

date: 28.04.2021
calculated: Ing. Pavel Svoboda
checked: Ing. Ladislav Šnajdar
revision: 0

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stend
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

test condition: 20 °C 0 bar
load condition 1: 110 °C 0 bar
load condition 2: 30 °C 0 bar

bolts: 8.8
4 x M12 (DIN 933:1970)
gasket: novapress 850 / novaform 2300 2,0mm (Rev. 1)
96 x 61 x 2 mm
tightness class: L 0.01

tightening device: torque wrench = wrench with measuring of torque
(only)

recommended assembly presetting: 80 Nm 0,074 mm 161 kN

min. required assembly presetting: 12 Nm 0,011 mm 24 kN

max. allowable assembly presetting: 83 Nm 0,076 mm 166 kN

max. load ratio bolts: 0,97 (assembly)
max. load ratio flange 1: 0,54 (load cond. 2)
max. load ratio flange 2: 0,54 (load cond. 2)
max. load ratio gasket: 0,34 (load cond. 1)
compliance of min. required gasket stress: ok

remarks:

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stend
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

input values

loads

	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
temperature	T	20	20	110	30 °C
internal pressure	p	0	0	0	0 MPa
additional forces	manual input				
external axial force	F _A	0	0	0	0 kN
shear force	F _L	0	0	0	0 kN
external bending moment	M _A	0	0	0	0 kNm
torsion moment	M _{TG}	0	0	0	0 kNm
remarks on loads					

geometry

flange 1

type	weld-neck flange
hub	conical hub
code	EN 1092-1:2008
nominal pressure / nominal size	PN6/DN50
blind hole	no
outer diameter flange	d ₄ 140,00 mm
bolt circle diameter	d ₃ 110,00 mm
inner diameter flange	d ₀ 54,50 mm
diameter of bolt hole	d ₅ 14,00 mm
thickness of flange ring	b _F 11,00 mm
thickness of wall	e _s 2,90 mm
wall thickness at thick end of hub	e ₂ 9,75 mm
length of conical hub	l _H 16,00 mm
type of raised faces	type B - raised face
code	EN 1092-1:2008
nominal pressure / nominal size	PN6/DN50
height of raised face	f ₁ 3,00 mm
outer diameter raised face	d ₁ 90,00 mm
remarks on flange 1	

flange 2

type	weld-neck flange
hub	conical hub
code	EN 1092-1:2008
nominal pressure / nominal size	PN6/DN50
blind hole	no
outer diameter flange	d ₄ 140,00 mm
bolt circle diameter	d ₃ 110,00 mm
inner diameter flange	d ₀ 54,50 mm
diameter of bolt hole	d ₅ 14,00 mm
thickness of flange ring	b _F 11,00 mm
thickness of wall	e _s 2,90 mm
wall thickness at thick end of hub	e ₂ 9,75 mm
length of conical hub	l _H 16,00 mm
type of raised faces	type B - raised face

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stand
ID code: DN50/80,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

code EN 1092-1:2008
nominal pressure / nominal size PN6/DN50
height of raised face f_1 3,00 mm
outer diameter raised face d_1 90,00 mm
remarks on flange 2

bolts
type of bolts screw
code DIN 933:1970
thread M12
pitch p_1 1,75 mm
nominal diameter d_{B0} 12,00 mm
basic pitch diameter d_{B2} 10,86 mm
effective diameter d_{Be} 10,36 mm
number of bolts n_B 4 -
nut thickness e_H 10,37 mm
clamping length l_b 34,49 mm
diameter internal bolt d_i 0,00 mm
remarks on bolts

gasket
type of gasket Type IBC - flat gasket (inner bolt circle)
code EN 1514-1:1997 - Form IBC
nominal pressure / nominal size PN6/DN50
quantity of gaskets 1,00
inner diameter d_{G1} 61,00 mm
outer diameter d_{G2} 96,00 mm
gasket thickness e_G 2,00 mm
rubber lining 0,00 mm
remarks on gasket

extension sleeve flange 1
code DIN 125 A:1990
thread M12
inner diameter d_i 13,00 mm
outer diameter d_a 24,00 mm
length h 2,50 mm

extension sleeve flange 2
code DIN 125 A:1990
thread M12
inner diameter d_i 13,00 mm
outer diameter d_a 24,00 mm
length h 2,50 mm
remarks on extension sleeve

materials

material flange
material name/number 1.0352 (P245GH)
code DIN EN 10222-2:2000
form of manufacture Forgings 35 < ϕ ≤ 50mm
austenitic no
cast no

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stend
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
temperature	T_{F1} 20	20	110	30	°C
strength parameter	$R_{p0,2T}$ 220	220	193	217	MPa
strength parameter	$R_{p1,0T}$				MPa
strength parameter	R_{mT} 410	410			MPa
modulus of elasticity	E_F 212000	212000	206200	211375	MPa
thermal expansion coefficient	α_F 1,19E-05	1,19E-05	1,25E-05	1,20E-05	K ⁻¹
minimum rupture elongation	A 23				%
determination of nominal design stress	according to Rp0,2/SB				
safety coefficient	S_F 1,05	1,05	1,5	1,5	-
nominal design stress	f_F 209,5	209,5	128,7	144,7	MPa
covering nominal design stress	f_E 209,5	209,5	128,7	144,7	MPa
remarks on flange 1					

material of bolts
material name/number
code
form of manufacture
austenitic
cast

8.8
DIN EN ISO 898
Bolt material
no
no

	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
temperature	T_B 20	20	110	30	°C
strength parameter	$R_{p0,2T}$ 640	640	585	634	MPa
strength parameter	$R_{p1,0T}$				MPa
strength parameter	R_{mT} 800	800			MPa
modulus of elasticity	E_B 212000	212000	205400	211333	MPa
thermal expansion coefficient	α_B 1,19E-05	1,19E-05	1,24E-05	1,20E-05	K ⁻¹
minimum rupture elongation	A 12				%
determination of nominal design stress	according to Rp0,2/SB				
safety coefficient	S_B 1,05	1,05	1,5	1,5	-
nominal design stress	f_B 609,5	609,5	390,0	422,7	MPa
remarks on bolts					

material of extension sleeve 1
material name/number
code
form of manufacture
austenitic
cast

1.1181 (C35E +N)
DIN EN 10269:2014
Steel for fasteners d ≤ 60 mm

	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
temperature	T_D 20	20	110	30	°C
strength parameter	$R_{p0,2T}$ 300	300	266	296	MPa
strength parameter	$R_{p1,0T}$				MPa
strength parameter	R_{mT} 500	500			MPa
modulus of elasticity	E_D 211000	211000	203200	210125	MPa
thermal expansion coefficient	α_D 1,03E-05	1,03E-05	1,12E-05	1,04E-05	K ⁻¹
minimum rupture elongation	A 20				%
determination of nominal design stress	according to Rp0,2/SB				
safety coefficient	S_D 1,05	1,05	1,5	1,5	-
nominal design stress	f_D 285,7	285,7	177,3	197,3	MPa
remarks on extension sleeve 1					

gasket characteristics

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stand
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

gasket manufacturer
gasket marking
material
scope
source gasket characteristics

Frenzelit
novapress 850 / novaform 2300 2,0mm (Rev. 1)
Faser
10 bar - L 0.01
GASKETDATA.ORG - ID: 467

temperature
minimum gasket stress
compressed gasket thickness
max. gasket stress
modulus of elasticity
additional deflection of the gasket due to creep
thermal expansion coefficient
friction factor
remarks on gasket characteristics

	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
T_G	20	20	110	30	°C
Q_{SMIN}	42	5	5	5	MPa
$e_{G(QA)}$	1,489				mm
Q_{SMAX}	220	220	76	203	MPa
E_G	1448	1448	1436	1453	MPa
Δe_{Gc}	0,000	0,010	0,101	0,020	mm
α_G	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	1,00E-05	K ⁻¹
μ_G	0,25	0,25	0,25	0,25	-

tightening device

nomenclature
scatter of bolt force
scatter of bolt force
neglection of torsion moment
number of re-assemblies
thread friction coefficient
friction factor connecting surface
remarks on tightening procedure

torque wrench = wrench with measuring of torque (only)

c_{t+}	0,160	-
c_{t-}	0,160	-
	no	-
N_R	10	-
μ_t	0,120	-
μ_n	0,120	-

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stand
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

calculation results

check of validity

flange 1

ratio width/height of flange ok

flange 2

ratio width/height of flange ok

shell connection -

effective gasket geometry

effective gasket diameter	d_{Ge}	75,50	mm
effective gasket width	b_{Ge}	14,50	mm
effective gasket area	A_{Ge}	3439,26	mm ²
gasket thickness in assembly	$e_{G(QA)}$	1,489	mm

flexibilities

axial flexibility modulus of bolts	X_B	1,24E-01	1/mm
rotational flexibility modulus of flange 1	Z_F	3,63E-04	1/mm ³
flexibility modulus of extension sleeves flange 1	X_W	2,36E-03	1/mm
rotational flexibility modulus of flange 2	Z_F	3,63E-04	1/mm ³
flexibility modulus of extension sleeves flange 2	X_W	2,36E-03	1/mm
axial flexibility modulus of gasket	X_G	4,33E-04	1/mm

loads

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
pressure force	F_Q	0	0	0	0	kN
axial force (addition bending moment)	F_{R+}	0	0	0	0	kN
axial force (subtraction bending moment)	F_{R-}	0	0	0	0	kN
axial thermal expansion	ΔU	0,000	0,000	0,001	0,000	mm

axial compliance

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
axial compliance related to gasket force	Y_G	1,27E-06	1,27E-06	1,31E-06	1,28E-06	mm/N
pressure force	Y_Q	1,25E-06	1,25E-06	1,29E-06	1,25E-06	mm/N
resulting additional force	Y_R	1,20E-06	1,20E-06	1,23E-06	1,20E-06	mm/N

minimum forces

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
minimum gasket force	F_{Greq}	19	17	17	17	kN

internal forces in assembly

minimum assembly gasket force	F_{Gdel}	21	kN
required gasket force	F_{Greq}	21	kN
required bolt force	F_{Breq}	22	kN
gasket force (several assemblies)	F_{Gdd}	145	kN

min. required assembly presetting

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stand
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

minimum assembly bolt force	$F_{B0nom,min}$	24	kN
corresponding bolt elongation	$\Delta L_{nom,min}$	0,011	mm
corresponding torque	$M_{nom,min}$	12	Nm

max. allowable assembly presetting

max. allowable assembly bolt force	$F_{B0nom,max}$	166	kN
max. allowable bolt elongation	$\Delta L_{nom,max}$	0,076	mm
max. allowable torque	$M_{nom,max}$	83	Nm

definition of assembly bolt force

chosen assembly bolt force	F_{B0nom}	161	kN
corresponding bolt elongation	ΔL_{nom}	0,074	mm
corresponding torque	M_{nom}	80	Nm

internal forces in subsequent condition

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
gasket force	F_G	177	140	90	134	kN
bolt force	F_B	177	140	90	134	kN
gasket stress	Q	42	41	26	39	MPa

internal forces in subsequent conditions resulting from F_{B0nom} (only informative)

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
gasket force	F_{Gmin}	145	140	90	134	kN
	F_{Gnom}	161	156	106	150	kN
	F_{Gmax}	177	172	121	166	kN
bolt force	F_{Bmin}	145	140	90	134	kN
	F_{Bnom}	161	156	106	150	kN
	F_{Bmax}	177	172	121	166	kN
gasket stress	Q_{min}	42,0	40,6	26,2	39,1	MPa
	Q_{nom}	47	45	31	44	MPa
	Q_{max}	51	50	35	48	MPa

check of tightness criteria

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2
compliance of min. required gasket stress	$Q_{min} > Q_{req}$	ok	ok	ok	ok
resistance against lateral loads	$F_{Gmin} > F_{req}$	ok	ok	ok	ok

check of admissibility of the load ratio

		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2
allowable load ratio	κ_{dA}	1,00	1,00	1,00	1,00
bolts	κ_{dB}	0,97	0,68	0,69	0,94
load ratio		ok	ok	ok	ok
flange 1					
load ratio	κ_{dF}	0,49	0,39	0,41	0,54
		ok	ok	ok	ok
flange 2					
load ratio	κ_{dF}	0,49	0,39	0,41	0,54
		ok	ok	ok	ok

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stěna
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

gasket
load ratio

Φ_Q	0,23	0,18	0,34	0,19
	ok	ok	ok	ok

flange rotation

flange 1

min. flange rotation
max. flange rotation

	assembly	test cond.	load cond. 1	load cond. 2	
θ_{Fmin}	0,15	0,14	0,09	0,14	*
θ_{Fmax}	0,18	0,18	0,13	0,17	*

flange 2

min. flange rotation
max. flange rotation

	assembly	test cond.	load cond. 1	load cond. 2	
θ_{Fmin}	0,15	0,14	0,09	0,14	*
θ_{Fmax}	0,18	0,18	0,13	0,17	*

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stand
ID code: DN50/80,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

detailed calculation results

calculation parameters

flange parameters

		flange 1	flange 2	
pitch between bolts	p_B	86,39	86,39	mm
eff. diameter of bolt hole	d_{Se}	5,64	5,64	mm
eff. bolt circle diameter	d_{3e}	96,25	96,25	mm
cross-section area of flange ring	A_F	523,50	523,50	mm ²
cross-section area of loose flange ring	A_L	0,00	0,00	mm ²
eff. width of flange ring	b_F	37,11	37,11	mm
eff. diameter of flange ring	d_F	97,25	97,25	mm
eff. thickness of flange ring	e_F	12,25	12,25	mm
equ. wall thickness for flexibility	e_E	6,50	6,50	mm
Intermediate variable	β	3,362	3,362	-
mean diameter shell	d_E	61,00	61,00	mm
lever arm correction	h_P	6,42	6,42	mm
lever arm	h_Q	10,38	10,38	mm
lever arm	h_H	17,63	17,63	mm
lever arm	h_L	0,00	0,00	mm
Intermediate variable	γ	0,279	0,279	-
Intermediate variable	β	0,894	0,894	-
Intermediate variable	β	0,000	0,000	-
correction factor	c_F	0,267	0,267	-
lever arm correction	h_B	6,66	6,66	mm
lever arm correction	h_T	7,61	7,61	mm
lever arm correction	h_Q	6,88	6,88	mm
lever arm correction	h_R	-1,00	-1,00	mm
correction factor	k_Q	0,850	0,850	-
correction factor	k_R	-0,150	-0,150	-
rotational flexibility modulus of flange	Z_F	3,63E-04	3,63E-04	1/mm ³
rotational flexibility modulus of flange	Z_L	0,00E+00	0,00E+00	1/mm ³

bolt parameters

eff. cross-section area	A_B	337,06	mm ²
axial flexibility modulus	X_B	1,24E-01	1/mm

gasket parameters

theoretical gasket width	b_{Gt}	14,50	mm
theoretical mean gasket diameter	d_{Gt}	75,50	mm
theoretical gasket area	A_{Gt}	3439,26	mm ²
gasket force for calculation of width	F_{Gt}	160,77	kN
Interim gasket width	b_{Gi}	14,50	mm
Effective gasket width	b_{Ge}	14,50	mm
Effective mean gasket diameter	d_{Ge}	75,50	mm
Effective gasket area	A_{Ge}	3439,26	mm ²
axial flexibility modulus	X_G	4,33E-04	1/mm

internal forces

loads	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
axial fluid-pressure force	F_Q	0	0	0	kN

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stěna
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

axial force (addition bending moment)	F_{R+}	0	0	0	0	kN
axial force (subtraction bending moment)	F_{R-}	0	0	0	0	kN
differential axial expansion	ΔU	0,000	0,000	0,001	0,000	mm
compliance of the joint		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
axial compliance related to FG	Y_G	1,27E-06	1,27E-06	1,31E-06	1,28E-06	mm/N
axial compliance related to FQ	Y_Q	1,25E-06	1,25E-06	1,29E-06	1,25E-06	mm/N
axial compliance related to FR	Y_R	1,20E-06	1,20E-06	1,23E-06	1,20E-06	mm/N
minimum forces necessary for the gasket		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
corrected additional deflection of the gasket due to cr	Δe_{Gc}	0,000	0,006	0,066	0,013	mm
min. gasket force in assembly	F_{G0min}	21,20				kN
min. gasket force in sub. conditions	F_{G0min}		17,20	17,20	17,20	kN
internal forces in assembly condition		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
min. gasket force for sub. Conditions	F_{G0el}	21,20				kN
min. gasket force for all conditions	F_{G0req}	21,20				kN
min. bolt force for all conditions	F_{B0req}	21,60				kN
scatter for global load above nom. value	e_+	0,100				-
scatter for global load above nom. value	e_-	0,100				-
nominal bolt force	F_{B0req}	24,00				kN
check of min. bolt force F_{B0req}		ok				-
max. bolt force	F_{B0req}	26,40				kN
max. gasket force	F_{G0req}	26,40				kN
internal forces in subsequent condition		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
max. gasket force	F_{G0d}	144,69				kN
accumulation of plastic deformation		yes				-
checking the admissibility of the load ratio						
general		flange 1	flange 2			
reduced max. allowable load ratio	κ_D	1,00	1,00			-
bolts		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
twisting moment applied to bolt shank	$M_{t,B}$	45,56				Nm
plastic torsion modulus	I_B	290,94				mm ³
bolt load ratio	κ_B	0,97	0,68	0,69	0,94	-
gasket		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
gasket load ratio	κ_G	0,23	0,18	0,34	0,19	-
flange 1		assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
equ. wall thickness for load limit	e_D	8,93				mm
intermediate variable	δ_D	0	0	0	0	-
intermediate variable	δ_R	0	0	0	0	-
intermediate variable	c_M	1,153256	1,153256	1,153256	1,153256	-
correction factor ($\beta_S=1$)	c_S	0,785398	0,785398	0,785398	0,785398	-
correction factor ($\beta_S=1$)	c_S	0,785398	0,785398	0,785398	0,785398	-
intermediate variable	l_M	1	1	1	1	-
intermediate variable	k_M	1	1	1	1	-
particular value	ψ_{opt}	1	1	1	1	-

flange #: Testovací příruba
plant: Testovací stend
ID code: DN50/60,3 PN6
nomenclature: EN 1092-1



Flange calculation according to EN 1591-1:2014

amtec

licensed for: MICO, spol. s r.o.

particular value	ψ_0	0	0	0	0	-
particular value	ψ_{max}	0,308532	0,308532	0,308532	0,308532	-
particular value	ψ_{min}	-0,308532	-0,308532	-0,308532	-0,308532	-
particular value	ψ_Z	0,308532	0,308532	0,308532	0,308532	-
resistance of flange	W_F	3,71E+06	3,71E+06	2,28E+06	2,56E+06	Nmm
flange load ratio	e_{ψ}	0,49	0,39	0,41	0,54	-

flange 2	assembly	test cond.	load cond.1	load cond.2	
equ. wall thickness for load limit	e_D	8,93			mm
intermediate variable	δ_{Q1}	0	0	0	-
intermediate variable	δ_{Q2}	0	0	0	-
intermediate variable	c_M	1,153256	1,153256	1,153256	-
correction factor (JS=1)	c_B	0,785398	0,785398	0,785398	-
correction factor (JS=1)	c_S	0,785398	0,785398	0,785398	-
intermediate variable	l_M	1	1	1	-
intermediate variable	k_M	1	1	1	-
particular value	ψ_{opt}	1	1	1	-
particular value	ψ_0	0	0	0	-
particular value	ψ_{max}	0,308532	0,308532	0,308532	-
particular value	ψ_{min}	-0,308532	-0,308532	-0,308532	-
particular value	ψ_Z	0,308532	0,308532	0,308532	-
resistance of flange	W_F	3,71E+06	3,71E+06	2,28E+06	2,56E+06 Nmm
flange load ratio	e_{ψ}	0,49	0,39	0,41	0,54